



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사학위논문

가변적 배관의 탐사를 위한
배관탐사로봇의 개발



2011년 2월

부경대학교 대학원

메카트로닉스 협동과정

박철한



공학석사학위논문

배관 탐사로봇의 개발 및 제어

지도교수 김 상 봉

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.



2011년 2월

부경대학교 대학원

메카트로닉스 협동과정

박 철 한

박철한의 공학석사 학위논문을
인준함.

2011년 2월



주 심 공학박사 정 영 석 (인)

위 원 공학박사 강 인 필 (인)

위 원 공학박사 김 상 봉 (인)

목차

목차.....	i
Abstract.....	iii
제 1 장 서론.....	1
1.1 연구 배경 및 기술동향.....	1
1.2 연구목적 및 방법.....	1 3
1.3 연구내용 및 범위.....	1 5
제 2 장 시스템의 구성.....	1 6
2.1 기구시스템의 구성.....	1 7
2.2 제어시스템의 구성.....	2 8
제 3 장 곡관 주행 알고리즘.....	3 2
3.1 곡관 인식의 필요성.....	3 2
3.2 곡관 주행을 위한 알고리즘.....	3 4
제 4 장 모터의 모델링과 제어기 설계.....	4 4
4.1 모터 모델링.....	4 4
4.2 제어기 설계 및 실험.....	4 7
제 5 장 시뮬레이션 및 실험 결과.....	4 9
5.1 시뮬레이션 결과.....	4 9
5.2 실험 결과.....	5 6
5.3 배관 주행 실험.....	6 2
5.4 배관 탐사 결과.....	6 3
제 6 장 결론.....	6 4
References.....	6 6

Publications and Conferences.....	7 1
부 록.....	7 2
감사의 글.....	7 9



Control and Development of Inpipe Inspection Robot for Variable Pipe Line

Chul Han Park

*Dept. of Interdisciplinary Program of Mechatronics Engineering,
The Graduate School, Pukyong National University*

Abstract

Recently, pipelines have a lot of dangerous accidents when they become old and corroded. To solve this problem, various methods has been studied for inspection of pipeline. Particularly, pipeline inspection methods using a robot are being studied. But these studies have been ended up simple research and development. Therefore, they are difficult to apply to industrial fields.

In this thesis, a new inpipe inspection robot combining wheel type and wall-press type is designed and developed. The developed inpipe inspection robot is to inspect the sea-water pipelines such as horizontal pipeline, vertical linear pipeline and elbow with variable diameters from 250mm to 350mm. The method for the developed inpipe inspection robot is as follows. First, the inpipe inspection robot is designed by Solid works and simulated as a virtual pipeline. The inpipe inspection robot is made by duralumin. The pipeline inspection robot are composed of *link part* for contacting with wall of the inner pipeline, *driving module part* spaced in

120° on front and back of the body of the inpipe inspection robot, *sensor attachment part* for attaching infrared sensor of the body of the inpipe inspection robot, *camera control part* for recording state of the wall of the inner pipeline, and *central axis* for compressive force generated by tensional spring. Second, kinematical modeling is a relational equation between *link structure* displacement of vertical direction and moving displacement of prismatic joint and is used to get proper compressive force needed for inspecting the inner of pipeline. Third, a driving algorithm in elbow using distances between robot and elbow is proposed for preventing damage of hardware generated by overload when the robot drives in a desired elbow. Forth, a PID-controller is designed for each motor track a given velocity from the driving algorithm for the robot to drive in straight pipeline and elbow. Fifth, camera with function of Pan-Tilt records state of the inner of pipeline and it is controlled manually. Sixth, a control system using DSP TMS320F28335, RS-232, infrared sensor and camera is developed for driving the robot. Finally, the efficiency and the effectiveness of the proposed controller of pipeline inspection robot are verified by simulation and experimental results.

제 1 장 서론

1.1 연구 배경 및 기술동향

산업화와 함께 공업 및 상하수도에 이르기까지 배관 시설은 다양한 분야에서 널리 사용되고 있는 중요기반시설이다. 그 중 낙후되고 오래된 배관의 경우 배관 검사를 통하여 위험요소를 제거하는 사전예방이 이루어져야 한다. 하지만 지금까지의 배관 검사는 해당 배관에 대한 해체 및 복개 작업등이 이루어지거나 사람이 직접 내부점검을 시행하였다. 이는 유독가스, 폐수 등의 경우에 인명사고로 이어질 수 있는 요소를 가지고 있다. 그리고 단순한 점검을 실시할 때 인적, 물적, 시간적 낭비를 초래한다. 특히 산업현장과 같은 대규모 공업시설에서 배관사고로 인한 피해는 막대한 손해비용과 인명피해를 초래할 수 있다.

원자력발전소 기계설비의 약 40%를 차지하는 배관의 점검 및 유지보수는 원자력발전소의 안정성과 관련하여 매우 중요한 문제이다. 특히, 방사성물질 1차계통 배관들은 파손시 안전에 직접적인 영향을 주기 때문에 원자력발전소 전 수명기간 동안 건전성이 보장되어야 한다. 따라서 원자력발전소의 주요 배관은 파손사고로부터 주요 기기 및 구조물을 보호할 수 있도록 정기적 점검과 유지보수가 필수적이다.

현재까지 배관을 점검하기 위한 방법은 다양하게 연구되어왔다. 도시가스배관은 도시의 주택의 증가와 인구 밀집으로 지하에 매설된 배관의 대부분을 차지한다. 이에 맞추어 류성무, 최혁렬

등[1,6]은 곡관, 수직관, 분지관 등의 소형 배관을 대상으로 펜토그래프형 구조를 가진 배관탐사로봇을 개발한 결과를 Fig. 1.1에 제시하였다.

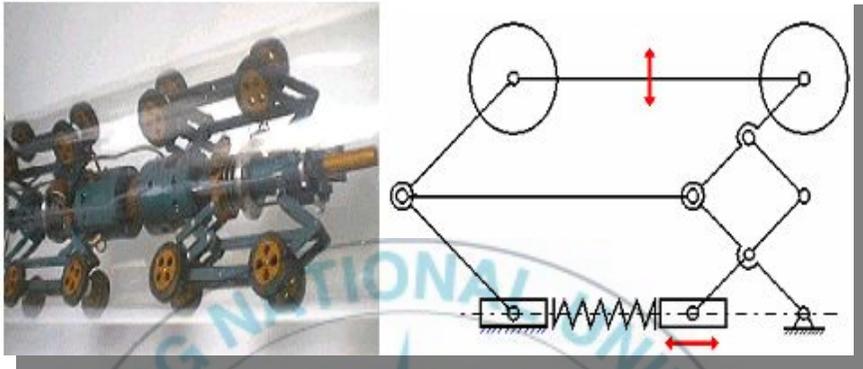


Fig. 1.1 MRINSPECT II

가스배관 탐사 중 곡관을 만났을 경우 구동부의 전력을 최소로 하기 위한 기구적 장치인 클러치를 사용하여 사용자가 선택적으로 구동부를 제어하게 하였다[2]. 곡관주행에 대한 이론적 접근을 제시한 노세곤 등[3]은 배관 탐사로봇이 곡관부에 진입할 때 각 바퀴의 주행 궤적을 산출해내어 바퀴의 속도비를 구하였다. 하지만 수식이 복잡하고 이론을 실제 적용하기에는 어려움이 많다. 최혁렬 등[4,7]은 여러 개의 배관 탐사로봇 모듈을 유니버설 조인트로 연결하여 수직관, 곡관, 분기관등에서 유연한 이동을 목표로 하였다. 하지만 유니버설 조인트를 이용하여 조향능력을 갖추었으나 수동 조작이라는 한계성을 가지고 있다.

최혁렬 등[5]은 Fig. 1.2와 같은 벽면 압착 메커니즘을 구현한 배관탐사로봇을 개발하였다. 그리고 배관 탐사로봇의 설계시 필요한 로봇의 조건 및 배관크기에 따른 효율적 설계를 제시하였다.

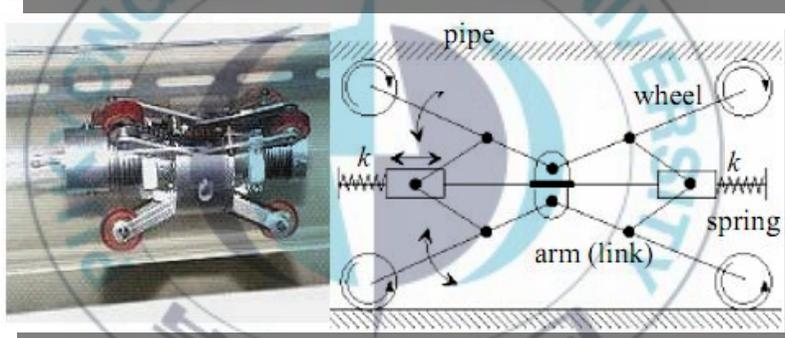
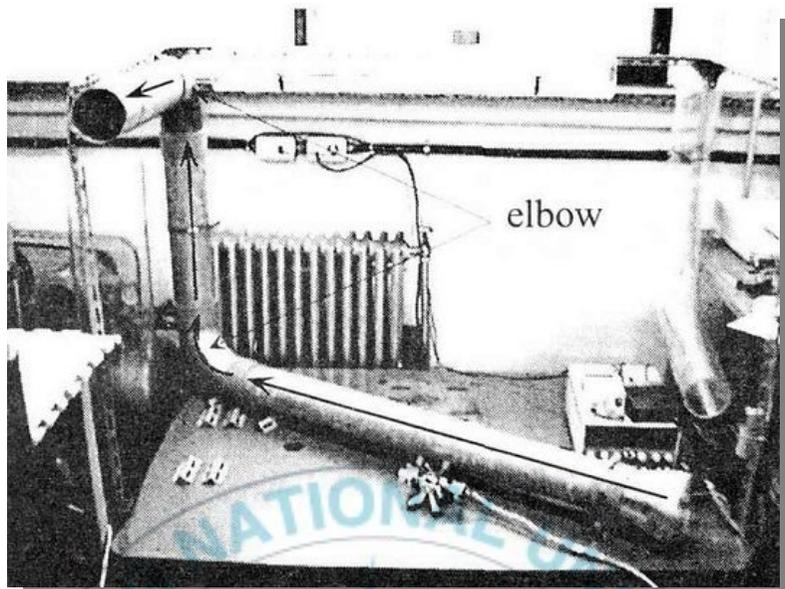


Fig. 1.2 MRINSPECT I

임훈 등[10]은 15mm직경의 초소형 배관을 탐사하는 배관 탐사로봇을 Fig. 1.3에 제시하였다. 배관탐사로봇은 케이블을 이용하여 움직이게 되며 자이로센서, 카메라센서 및 조향장치를 사용하여 맵빌딩을 시도하였으나 탐사할 수 있는 배관길이가 제한적이며 소형배관에 국한된 문제점이 있다.



Fig. 1.3 Semi-Automatic Robot System

K. U. Scholl 등[17]이 개발한 배관 탐사로봇은 바퀴 타입으로 지하에 매설된 배관이 지면과 수평으로 놓여져 있는 경우에만 적용이 가능하며 점검할 수 있는 배관이 제한되어있다. Nassiraei 등[13]은 Fig. 1.4와 같은 구동메커니즘을 개발하고 레이저센서, 카메라 등 다양한 센서를 조합하여 복잡한 배관에서의 적용을 시도했지만 그림과 같이 수평배관만을 대상으로 하였다.

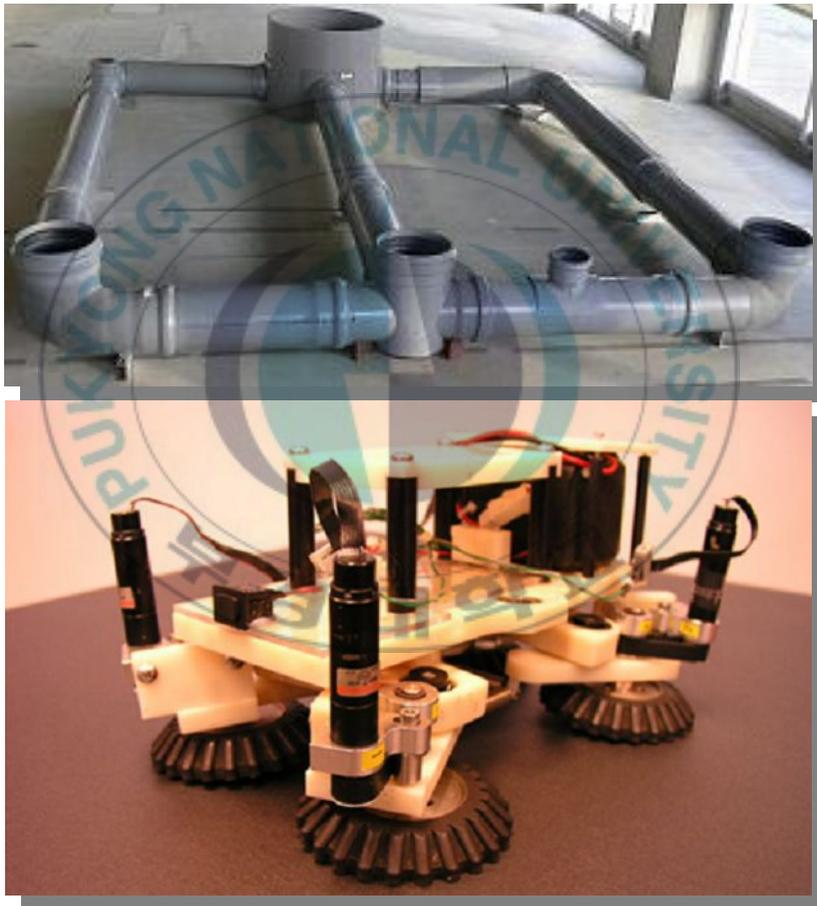


Fig. 1.4 Autonomous Sewer Pipe Inspection Robot “KANTARO”

Fig. 1.5는 M. Moghaddam 등[18]이 개발한 250~500mm 배관을 대상으로 수직 및 수평 주행 메커니즘을 사용한 로봇을 나타내었으며 카메라와 초음파센서를 사용하여 배관의 상태를 점검하였다. 그리고 배관면에 압착력을 생성하기 위해 볼스크류를 사용하였으며, 배관탐사 중 작은 장애물을 만났을 경우를 대비하여 스프링 댐퍼를 링크구조에 사용하였다. 하지만 구동부가 무한궤도바퀴의 형태로 곡관부를 주행할 때 어려움이 있다.

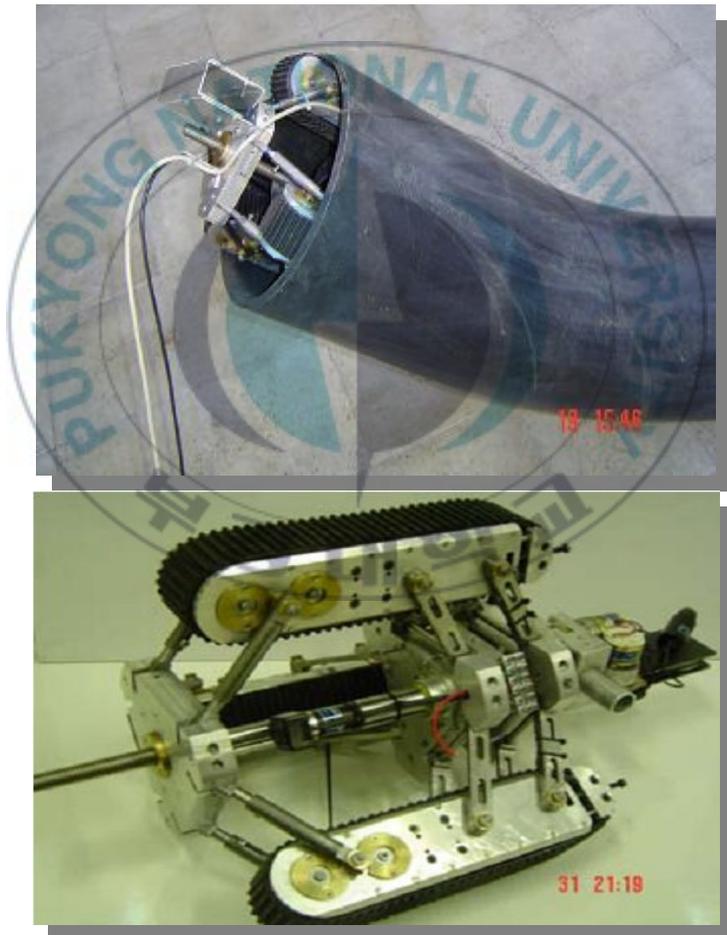


Fig. 1.5 Fabricated Prototype

Fig. 1.6는 four-bar 시스템을 사용하여 압착력을 만드는 메커니즘이다[20]. 다른 링크구조를 사용한 로봇[4]에 비해 구조가 간단하며 중심축에 설치된 스프링으로부터의 힘 전달이 효율적이다. 그리고 자이로센서와 각속도센서를 사용한 맵빌딩 방법을 제시하였다. 하지만 곡관주행에 대한 알고리즘이 없으며 탐사할 수 있는 배관의 크기가 100mm이하이다.

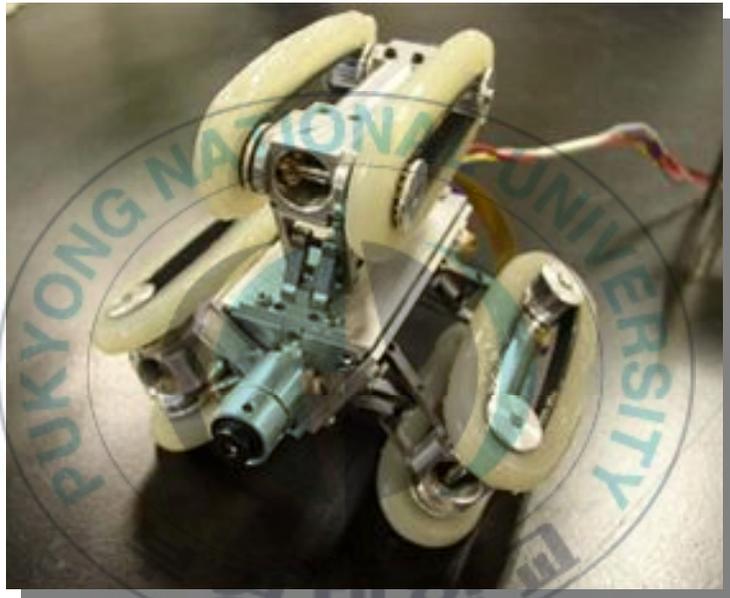


Fig. 1.6 Pipeline Inspection Robot Using Four-bar System

Fig. 1.7은 Peng Li 등[22]이 개발한 소형배관탐사를 위한 로봇이며 배관의 크기를 고려하여 액츄에이터를 선정하였고 구조를 단순화하여 무게를 줄였으며 구동효율도 높였다. 그리고 배관탐사 로봇의 바퀴와 배관면 사이에 접촉할 수 있는 바퀴의 수를 늘려 자세의 안정성을 높였다. 하지만 주행알고리즘에 대한 언급이 없이 주행 메커니즘 개발에 초점이 맞춰져 있다.

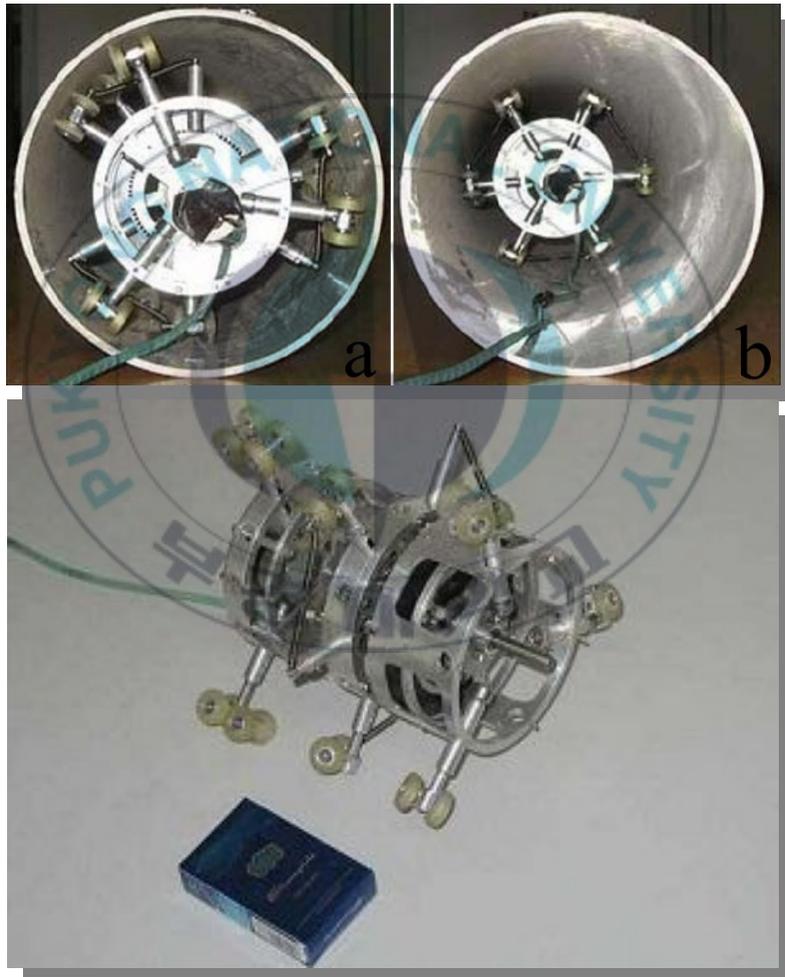
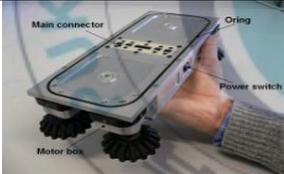


Fig. 1.7 Inpipe Inspection Robot for Small Pipeline

시뮬레이션을 통하여 배관상태를 예측하고 평가하는 NPIS (nuclear Piping Integrity Expert System) 시스템은 지하매설 배관을 대상으로 하며 배관의 형상과 하중 조건 등의 재료물성치를 입력하여 예측 가능한 누설균열을 알아낸다[24]. 오래된 지하매설 배관의 경우 하중조건 및 재료의 물성치가 변형됐을 가능성이 있다.

지금까지 개발되고 있는 배관탐사로봇의 주행 형태를 나누어 보고 이에 대한 간략한 설명은 Table 1과 Fig. 1.7에 나타난 것과 같다.

Table.1 Classification of Pipe Inspection Robot

<p>(1) Pig type</p> 	<p>탐사로봇과 배관면 사이에 완전 밀착된 형태로써 유압을 이용하여 전진을 하며 센서장비를 부착하여 배관 내벽의 상태를 점검한다.</p>
<p>(2) Wheel type</p> 	<p>일반차량과 비슷한 형태로 쉽게 조향을 할 수 있으며 수평관에서 효과적이다. 하지만 수직관에서는 사용이 불가능한 단점을 가지고 있다.</p>
<p>(3) Caterpillar type</p> 	<p>배관 탐사로봇과 배관면의 접촉 면적이 넓어 이동이 쉽다. 하지만 곡관부에서 방향전환이 힘들다는 단점이 있다.</p>
<p>(4) Wall-press type</p> 	<p>수직관에서 배관 탐사로봇이 이동 가능한 구조이며 압착력을 만드는 형태가 대부분 스프링을 이용하고 있는 중이다.</p>

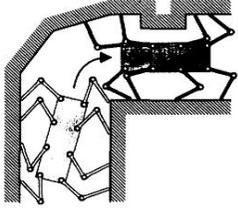
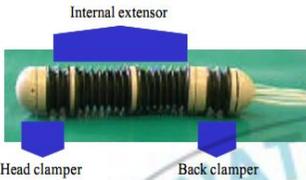
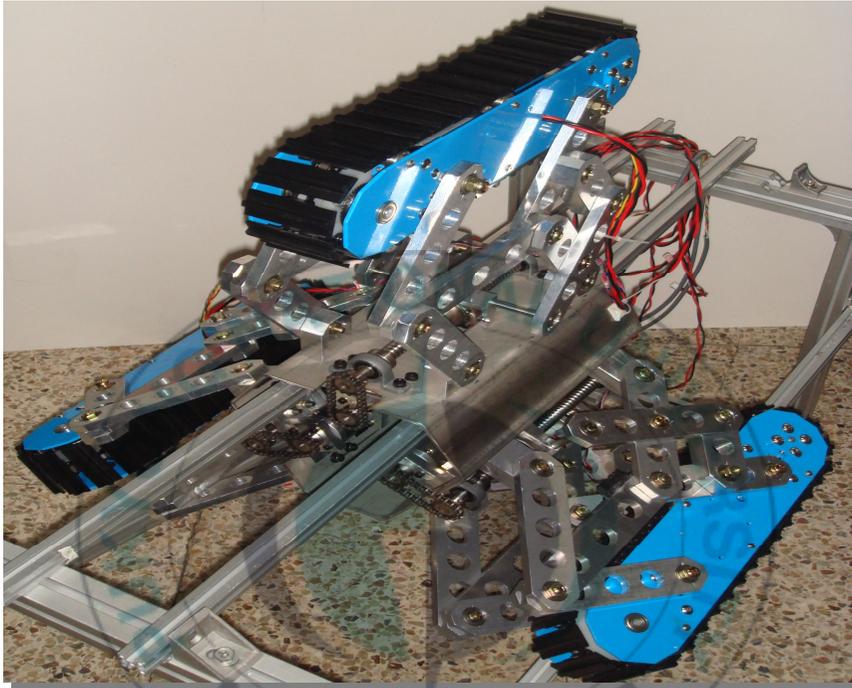
(5) Walking type	
	<p>여러 개의 다리관절을 사용하였고 각 관절을 제어하기가 어려우며 수직 및 수평 배관에서 안정적인 자세를 유지하기가 어렵다.</p>
(6) Inchworm type	
	<p>초소형 배관을 탐사하는 목적으로 개발되고 있으며 구조가 간단하고 제어가 용이하다.</p>
(7) Screw type	
	<p>각 바퀴들이 나선형으로 배치되어 있으며 몸체의 회전을 이용하여 전진하게 된다.</p>

Fig. 1.8은 김대원 등[25]이 개발한 펜토그래프형 링크구조를 지닌 배관 탐사로봇이며, 압착력을 일정하게 하기 위한 제어기를 제안하였다.



Item	Length of Robot	Weight of Robot	Variable dimension
Value	0.45m	30kg	0.53m~0.88m

Fig. 1.8 Inpipe Inspection Robot Using Caterpillar Wheel

즉, 원자력발전소 지하매설 배관 탐사로봇에 대한 연구의 결과로 벽면 압착력을 발생시키는 메커니즘을 제시하였으며, Mass-Spring-Damper구조로 모델링을 하여 프로세스 모델 동정법으로 90%이상의 동정률을 가지는 공칭모델을 유도하였다. 이 공칭모델을 기초로 하여 압착력 관측기를 설계하여 성능을 검증하였고 설계된 관측기의 출력인 기준 압착력과 실제 측정된 압착력의 오차를

영으로 하는 압착력 PD제어기를 제시하였다. 즉, 실제 측정된 압착력이 기준 압착력을 추종하도록 하였다. 그리고 실험을 통하여 제어기의 성능을 검증하였다.

원자력 배관을 목표로 배관 탐사로봇을 개발하기 위해서는 수평과 수직에서 구동이 가능해야 한다. Table 1의 (2)와 같은 바퀴형 배관 탐사로봇은 수직이동이 불가능하며 벽면 압착형을 제외한 모든 타입의 로봇이 소형배관 및 정해진 규격만을 대상으로 하고 있으므로 원자력 배관에 적용하기가 어렵다. 그리고 곡관주행시 바퀴의 속도를 조절하지 않으면 끼임, 충돌현상과 바퀴와 기구부의 손상을 초래하게 된다. 따라서 이러한 문제점들을 해결하기 위해서는 새로운 형태의 배관 탐사로봇 및 곡관주행 알고리즘개발이 절실히 요구된다.



1.2 연구목적 및 방법

원자력 발전소의 해수 냉각수 계통 배관은 발전소 기기 냉각에 필수적 요소로 그 역할비중이 매우 크다. 배관의 낙후와 손상으로 인한 인적 피해와 물적 피해는 막대한 비용적 손해를 불러오므로 사전 점검 및 유지보수는 필수적이다. 그래서 배관의 적절한 점검 방법의 개발이 요구 되고 있다. 기존의 점검방식은 인력을 이용하고 비용, 저효율 방식으로 유독가스로 인한 질식의 위험이 있다. 그리고 노출배관의 경우 배관을 직접 열어 사람이 눈으로 확인하는 수준으로 정확한 점검이 불가능하다. 이에 해수 냉각수 계통의 배관을 탐사할 수 있는 탐사로봇의 개발하여 배관점검의 안정성을 확보하고 비용을 최소화 하여 배관 내부의 상태를 파악하고 이를 유지보수 해야 한다.

지금까지 배관 탐사로봇은 도시 가스배관에 초점을 맞추어 개발되어 왔다[1,3-6]. 도시 가스배관의 다양한 형태로 인해 기구부의 또한 다양한 형태로 개발되어 왔다. 그 중 벽면 압착형 타입은 스프링을 사용하여 압착력을 생성하며 바퀴형 로봇을 결합하여 구동의 효율을 높여 왔다. 하지만 탐사로봇의 개발에 초점이 맞춰져 구동 알고리즘에 대한 연구는 미비한 상태이다.

배관 탐사로봇의 적용분야가 국한적인 면을 고려할 때 새로운 현장에서 기존의 로봇을 적용하기에는 한계가 있다. 원자력 발전소의 특성상 배관의 크기는 소형배관보다는 중대형 배관이 주를 이루고 있으며 배관 내벽의 상태 또한 가스배관에 비하여 이물질 등이 많아 로봇개발에 신중을 기해야 한다.

본 연구에서는 250~300mm배관을 점검하기 위해 바퀴형과 벽면압착형을 결합한 배관 탐사로봇과 곡관주행 알고리즘을 개발하는데 그 목적을 두고 있다. 이를 위해 배관 탐사로봇을

개발하기 전 먼저 점검할 배관의 크기를 알아야 하며 그 후 탐사로봇의 길이와 폭을 결정한다. 대략적인 탐사로봇의 크기가 결정되면 시뮬레이션 툴인 Solid works를 이용하여 로봇의 기구부를 설계하고 시뮬레이션을 통해 250~300mm배관에서 구동이 가능한지 확인한다. 그리고 시스템의 구성을 기구시스템과 제어시스템으로 나누고 배관 탐사로봇의 모터 모델링과 배관주행 알고리즘을 제안한다. 제안된 모델링을 바탕으로 배관 주행동안 탐사로봇의 기준속도를 추적하기 위한 PID제어기를 제안한다. 제안된 제어기를 구현하기 위해 제어시스템을 개발한다. 시뮬레이션과 실험결과들을 통해 제안된 PID제어기의 유효성과 산업분야로의 적용가능성을 검증한다.



1.3 연구내용 및 범위

배관 탐사로봇의 기구학적 모델링을 제시하고, 이를 바탕으로 배관 탐사로봇을 제어하기 위한 제어 알고리즘과 곡관 주행 알고리즘을 적용하여 시뮬레이션 및 실험을 통해 그 타당성을 검증한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다.

- 제 1장: 배관 탐사로봇에 대한 종래의 연구동향을 살펴보고 곡관 주행알고리즘의 적용을 통하여 본 연구의 필요성과 목적을 제시한다. 그리고 연구방법에 대한 간략한 소개와 함께 연구 내용 및 범위를 제시한다.
- 제 2장: 배관 탐사로봇의 구성을 기구시스템과 제어시스템으로 나누어 설명한다.
- 제 3장: 배관 탐사로봇에 사용되는 센서의 특징과 저역통과 필터를 설계하여 그 성능을 입증한다. 그리고 곡관 인식의 필요성과 주행 알고리즘을 제시한다.
- 제 4장: 모터의 동역학적 모델링을 바탕으로 기준 각속도를 추적할 수 있도록 PID제어기를 제시하고 실험을 통해 설계된 제어기의 성능을 검증한다.
- 제 5장: 배관 탐사로봇에 대한 시뮬레이션 및 실험 결과를 통하여 앞에서 제시한 곡관 주행알고리즘과 제어기에 대한 유효성을 알아본다.
- 제 6장: 본 연구의 결론 및 향후의 연구에 대한 내용을 기술한다.

제 2 장 시스템의 구성

Fig. 2.1은 본 연구에서 개발된 배관 탐사робот을 나타내며 기구시스템과 제어시스템으로 구성되어 있다. 기구시스템은 몸체부, 링크구조부, Driving module part, 카메라 조작부와 센서 부착부로 구성되었으며 이들은 3D설계를 바탕으로 중심축, 링크기구와 바퀴의 프레임은 두랄루민으로 제작되었고 로봇의 바퀴 트랙부분은 접착성이 좋은 고무로 제작되었다. 제어시스템은 마이크로 컨트롤러부, 센서 인터페이스부와 모터 드라이버부가 집적되어있다.

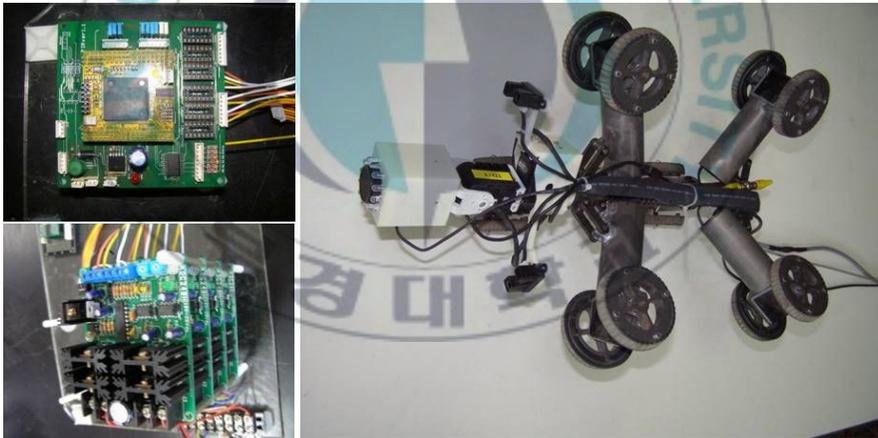
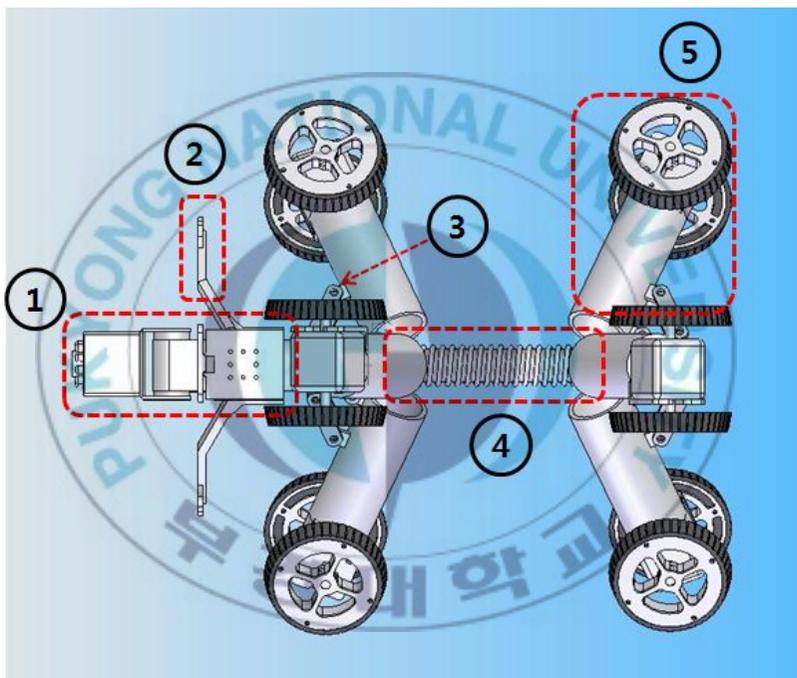


Fig. 2.1 Developed Pipe Inspection Robot

본 장에서는 배관 탐사робот 기구시스템의 설계과정 및 구성 그리고 제어시스템의 구성에 대해서 서술한다.

2.1 기구시스템의 구성

본 연구에서는 1장에서 설명한 여러 로봇형태 중 벽면 압착형 로봇과 바퀴형 로봇을 결합한 배관 탐사로봇으로서, 기구시스템의 개발을 위해서 기구설계 프로그램인 3D툴을 이용하여 설계하였다. Fig. 2.2는 3D툴을 이용하여 설계된 배관 탐사로봇을 나타낸 것이다.



①	카메라 조작부	②	센서 부착부
③	링크 구조부	④	배관 탐사로봇 몸체
⑤	Driving module part		

Fig. 2.2 Configuration of Inpipe Inspection Robot

Fig. 2.2에서 각 기구장치의 구성 및 기능은 다음과 같다.

- ① 카메라 조작부: CMOS카메라 1개와 소형 모터2개로 구성되어 Pan-Tilt기능을 갖추고 있고 배관 내벽의 상태를

상세히 알아보기 위한 좌·우 및 회전장치이며 수동 조작을 통해 카메라의 회전 및 좌·우이동을 하게 하며 몸체의 앞쪽에 설치되어 있다.

- ② 센서 부착부: 모두 3개의 부착부로 120°간격으로 이루어져 있으며 Driving module과 평행하게 놓여져 있으며 몸체의 앞쪽에 설치되어 있다. 곡관부 주행을 위한 로봇에서 배관 내벽까지의 거리를 측정하기 위해 3개의 적외선센서를 부착하게 된다.
- ③ 링크 구조부: 구동부 몸체 둘레에 120° 간격으로 전·후에 각각 3개씩 부착되어 모두 6개의 링크구조로 구성되어 있다. 몸체중심축의 병진운동 관절(Prismatic Joint)과 모터케이스의 회전운동 관절(Hinge Joint)과 연결되어 있으며 스프링 인장력을 이용하여 배관탐사로봇이 배관 벽면에 밀착할 수 있도록 설계된 구조이다.
- ④ 배관 탐사로봇 몸체: 중심축, 병진운동 관절(Prismatic Joint), 인장스프링으로 구성되어 있으며 배관탐사로봇의 바퀴가 배관의 벽면과 밀착할 수 있도록 압착력을 생성하는 구조로 되어있다.
- ⑤ Driving Module: 모두 6개의 Driving Module이 있으며 각 Module은 모터와 바퀴로 구성되어 있으며 120°의 간격으로 링크구조와 연결되어 있으며 몸체 전·후방에 각각 3개씩 부착되어 있다. 배관의 내벽에 밀착하여 구동할 수 있는 구조로 설계되었다.

배관 탐사로봇이 탐사할 배관은 직관뿐만 아니라 곡관 등을 포함하고 있다. 특히 곡관부를 탐사할 때 이동로봇의 너비와 길이가 특히 중요하다. 왜냐하면 해수배관 곡관부의 곡률반경은 관경의 1.5배정도이며 이동로봇의 길이가 길어지면 곡관부에서 끼여버리는

현상이 발생되기 때문이다. 이러한 현상을 방지하기 위해 본 연구에서 배관 탐사로봇의 크기를 설계하는 것은 매우 중요한 부분이다.

Fig. 2.3은 배관 탐사로봇이 곡관을 자연스럽게 이동할 수 있도록 배관 탐사로봇의 크기를 설계하기 위한 원리를 나타낸 것이다. 끼임 현상이 나타날 수 있는 형태는 배관 탐사로봇이 곡관부에서 45°로 놓여져 있을 때이다. 이때 곡관부에서 구속되는 조건은 두가지로 나누어 볼 수 있다. 배관 탐사로봇이 W 의 직경을 가지는 원통이라 가정한다.

Fig. 2.3는 배관의 직경과 곡률반경에 비해 W 가 작아 배관 탐사로봇의 끝부분이 회전할 때 직관부의 벽에 닿게 되는 경우이다. 이때 곡률반경(R)이 배관 직경(D)과 크기가 같다고 가정하면 W 는 식(2.1)과 같다. (부록 A참조)

$$0 < W \leq \left(R + \frac{D}{2}\right) \sin 45^\circ - \left(R - \frac{D}{2}\right) \quad (2.1)$$

여기서 D 는 배관의 직경, R 은 배관의 곡률반경, W 는 배관 탐사로봇의 폭, L 는 곡관부를 이동할 수 있는 배관 탐사로봇의 최대 길이이다.

이때 곡관부를 이동할 수 있는 배관 탐사로봇의 최대 길이는 식(2.2)와 같다. (부록 A참조)

$$L = 2\sqrt{2} \left(\frac{D}{2} + R - \left(R - \frac{D}{2} + W \right) \cos 45^\circ \right) \quad (2.2)$$

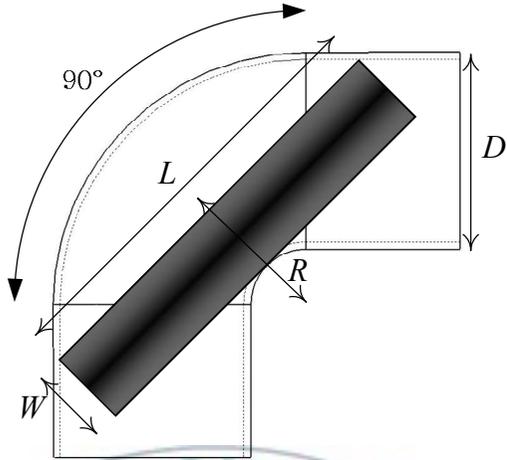


Fig. 2.3 Maximum Length of Inpipe Inspection Robot Movable in Elbow

Fig. 2.4는 곡관부를 이동할 때 배관 탐사로봇의 끝부분이 곡관부의 벽에 닿게 되는 경우로 이때 W 는 다음과 같다. (부록 A참조)

$$\left(R + \frac{D}{2}\right) \sin 45 - \left(R - \frac{D}{2}\right) < W < D \quad (2.3)$$

이때 곡관부를 이동할 수 있는 배관 탐사로봇의 최소 길이는 다음과 같다.

$$L = 2\sqrt{\left(\frac{D}{2} + R\right)^2 - \left(R - \frac{D}{2} + W\right)^2} \quad (2.4)$$

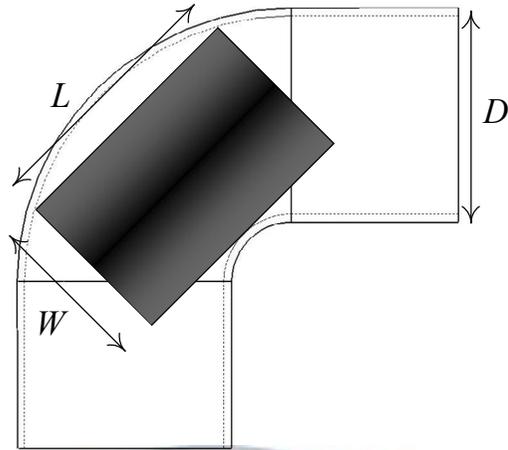


Fig. 2.4 Minimum Length of Inpipe Inspection Robot Movable in Elbow

식(2.1)~(2.4)를 이용하여 곡관부에서 끼임 현상없이 이동할 수 있는 배관 탐사로봇의 크기를 결정할 수 있다.

구동부의 기구학적 구조는 제한된 배관에서 관경의 변화에 상관없이 수평, 수직 및 곡관을 자유롭게 이동할 수 있어야 한다. 이를 위해 구동부는 다음의 조건들을 만족해야한다.

- 벽면 압착 메카니즘을 구현하여야 한다.
- 관경의 변화에 따른 압착력의 변화가 적어야 한다.

특히 수직관을 이동할 때 압착력의 변화로 인해 배관 탐사로봇이 이동할 수 없는 상황에 놓여질 수 있다. 따라서 인장스프링을 사용하여 배관 탐사로봇이 유연하게 이동할 수 있도록 배관 벽면에 압착할 수 있는 기구학적 구조가 필요하다.

Fig. 2.5는 환경의 변화에 적응하기 위한 배관탐사робот의 링크구조를 보여주고 있다. 본 연구에 있어서 배관 탐사робот의 환경 변화는 250mm~350mm이다.

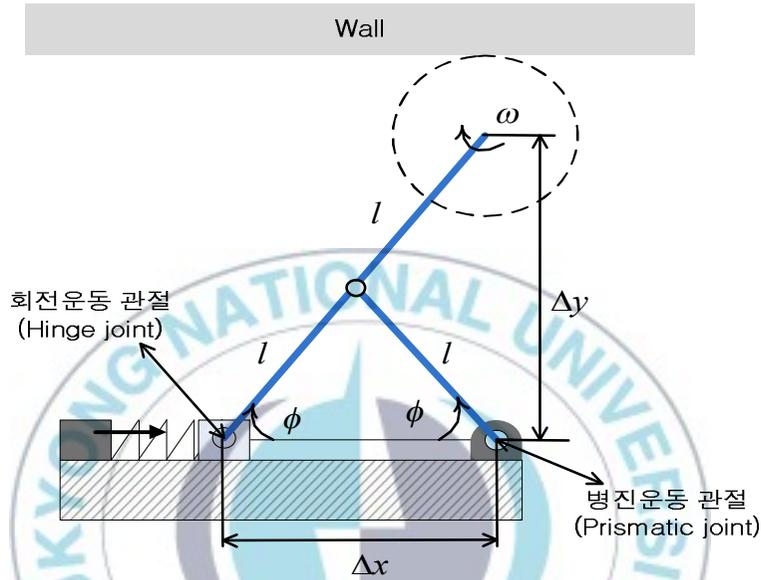


Fig. 2.5 Construction Design of Link

인장스프링을 사용한 벽면 압착 메커니즘을 확인할 수 있으며, Fig. 2.5로부터 다음과 같은 링크구조에 대한 기구학적 관계식을 얻을 수 있다.

$$\Delta y = \Delta x \tan \phi = \sqrt{(2l)^2 - \Delta x^2} \quad (2.5)$$

여기서 Δx 는 회전운동 관절의 이동변위이고, Δy 는 링크 구조의 변화에 의해 바퀴 높이의 변위이고, l 은 링크의 길이이고, ϕ 는 링크와 중심축사이의 각도이다. 식(2.5)를 이용하여 배관의

크기변화에 따라 압착력을 유지할 수 있는 로봇의 링크구조를 설계할 수 있다.

Fig. 2.6은 식(2.5)를 바탕으로 설계된 링크 길이를 사용하여 제작된 링크 구조를 나타내고 있다.

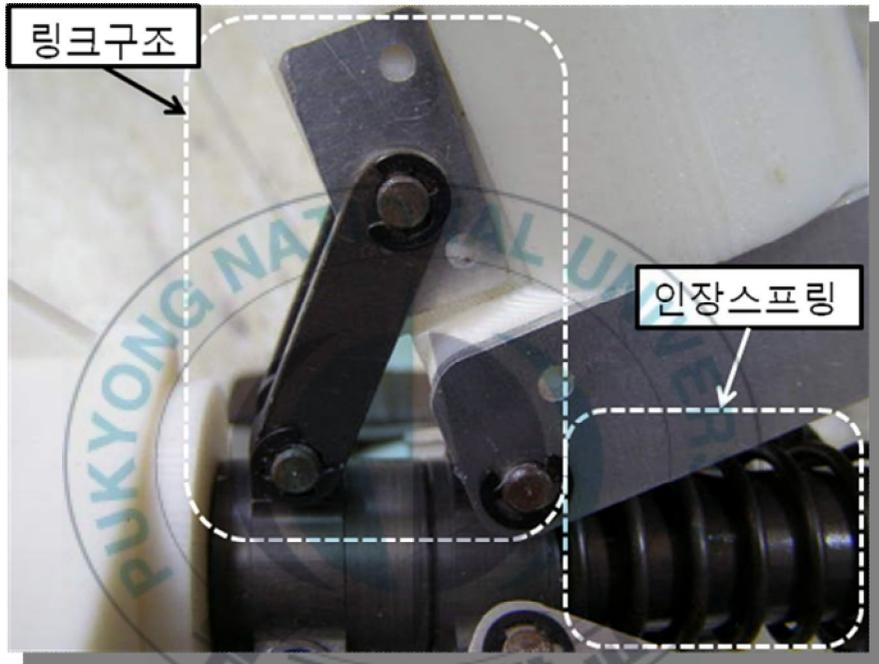


Fig. 2.6 Link of Inpipe Inspection Robot

6개의 링크구조를 사용하여 제작한 배관 탐사로봇의 Driving module part는 Fig. 2.7과 같으며 링크구조부와 Driving module part는 몸체의 전면 및 후면에 각각 설치되어 있다.

배관 탐사로봇 의 설계 제원은 Table 2.1에 나타낸다.

Table 2.1 Specification of Pipe Inspection Robot

Item	Value
Length of Robot	0.30m
Weight of Robot	7kg
Variable dimension	0.25m ~ 0.35m



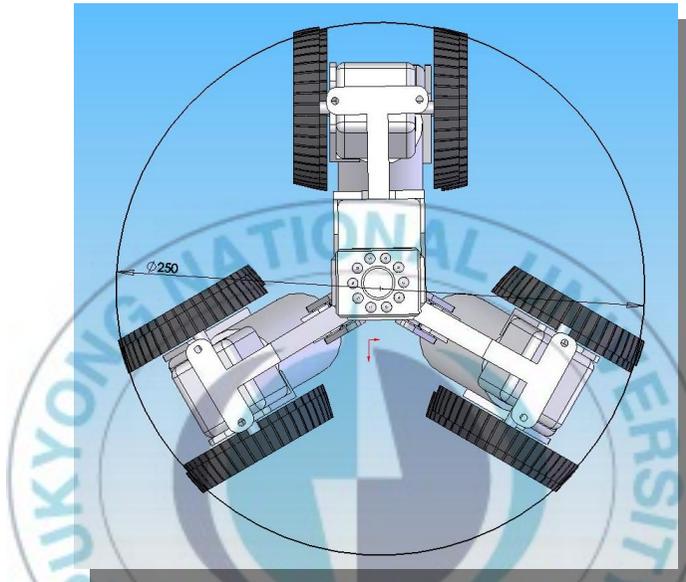
Fig. 2.7 Driving Module Part and Prototype of Inpipe Inspection Robot

배관 탐사로봇의 중심축에 위치한 스프링은 배관의 직경 변화에 따른 능동적 대응이 가능하고 일정한 압착력을 얻는데 효과적이다. 하지만 스프링의 탄성을 결정할 때 배관 탐사로봇의 주행 환경을 수직관으로 설정하고 미끄러짐 없이 일정한 하중을 달고 주행할 수 있도록 충분한 압착력을 고려해야 한다. 또한 압착력에 비례하여 바퀴의 모터추진력을 고려해야 하며 그렇지 않을 경우 수직배관 주행이 불가능해진다.

배관탐사 로봇이 탐사할 배관의 직경은 250mm ~ 350mm 이다. 따라서 링크구조의 구동 범위가 배관의 직경 조건에 만족시켜야 한다.



Fig. 2.8은 본 연구에서 배관의 최소반경을 250mm로 한 경우로 배관에서 구동부를 정면으로 본 형태와 링크구조의 상태를 각각 (a)와 (b)에 나타낸 것이다. 그리고 링크구조를 최대한 확장한 경우이고 몸체 중심에서 바퀴끝단부분의 길이는 최소가 된다.



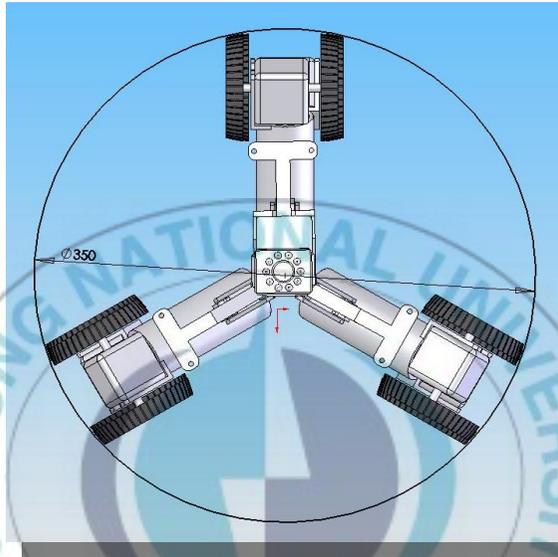
(a) Front View in 250mm Diameter Pipeline



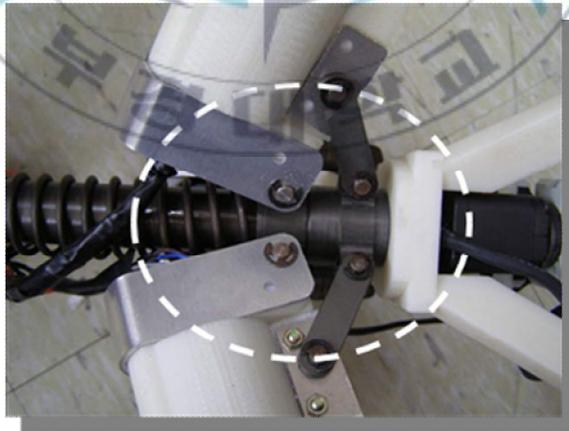
(b) Extension of Link

Fig. 2.8 State of Inpipe Inspection Robot in 250mm

배관의 최대반경을 350mm로 결정하고 배관에서 구동부를 정면으로 본 형태와 링크구조의 상태를 각각 Fig. 2.9의 (a)와 (b)에 나타나있다. 링크구조를 최대한 수축한 경우이고 몸체 중심에서 바퀴 끝단부분의 길이는 최대가 된다.



(a) Front View in 350mm Diameter Pipeline



(b) Compression of Link

Fig. 2.9 State of Inpipe Inspection Robot in 350mm

2.2 제어시스템의 구성

이 절에서는 2.1절에서 서술한 배관 탐사로봇을 제어하기 위한 제어시스템에 대해서 논한다. 본 시스템을 제어하기 위한 제어시스템의 구성도는 Fig. 2.10과 같다.

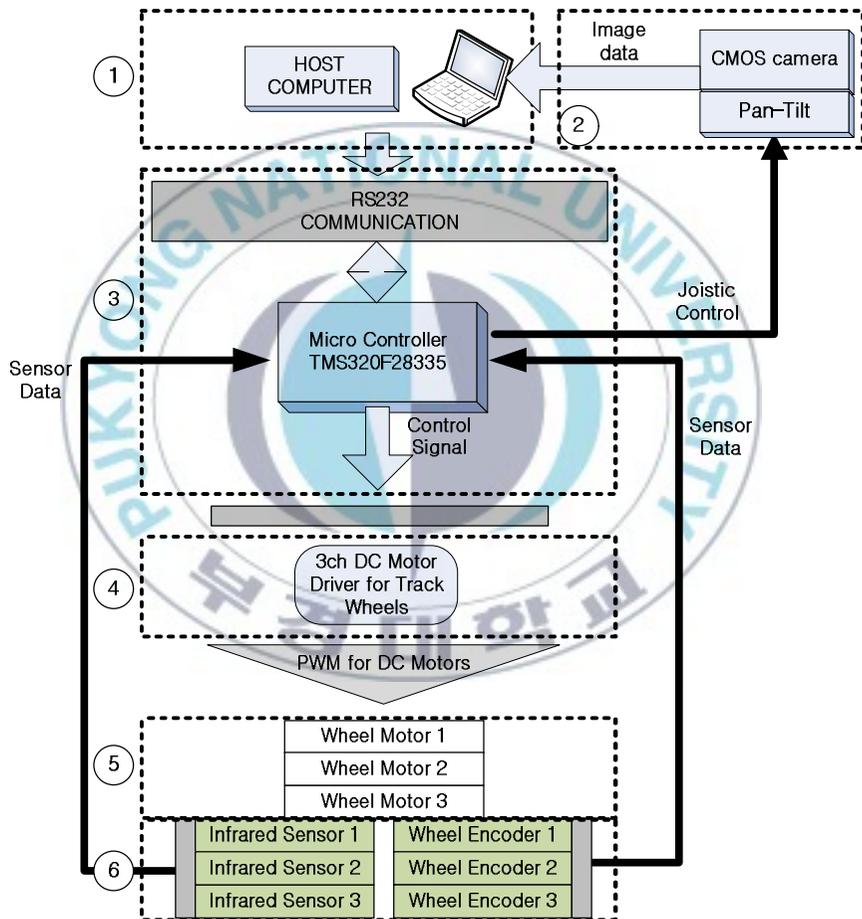


Fig. 2.10 Scheme of Control System

①	호스트 컴퓨터	②	영상 제어부
③	마이크로컨트롤러부	④	액츄에이터 드라이버부
⑤	액츄에이터부	⑥	센서부

Fig. 2.10에서 각 기구장치의 구성 및 기능은 다음과 같다.

- ① 호스트 컴퓨터: RS232 유선통신으로 로봇구동 제어 명령을 전달한다. 그리고 카메라의 영상데이터를 받아들인다.
- ② 영상 제어부: 로봇의 전방에 설치된 카메라가 배관 내벽의 상태를 촬영하여 호스트 컴퓨터로 전송한다.
- ③ 마이크로컨트롤러부: DSP TMS320F28335와 RS232통신 인터페이스부, 센서 인터페이스부, PWM 인터페이스부로 구성되어 있으며 호스트컴퓨터로부터 전달되는 제어명령을 수행하고 데이터 전송과 PWM제어를 한다. 그리고 사용자로부터 수동적으로 조이스틱 입력값을 받아 카메라의 Pan-Tilt기능을 수행한다.
- ④ 액츄에이터 드라이버부: 마이크로 컨트롤러부로부터 액츄에이터 구동 신호인 PWM을 스위칭한다.
- ⑤ 액츄에이터부: 액츄에이터 드라이버부로부터 스위칭된 PWM으로 구동된다.
- ⑥ 센서부: 적외센서를 사용하여 배관 탐사로봇과 곡관부 벽면까지의 거리를 측정한다. 그리고 엔코더를 사용하여 바퀴의 각속도를 측정하게 된다. 측정된 데이터는 마이크로 컨트롤러부로 전송된다.

Fig. 2.11은 배관 탐사로봇에 탑재된 마이크로 컨트롤러부와 모터 드라이버부의 외형 사진들이다.

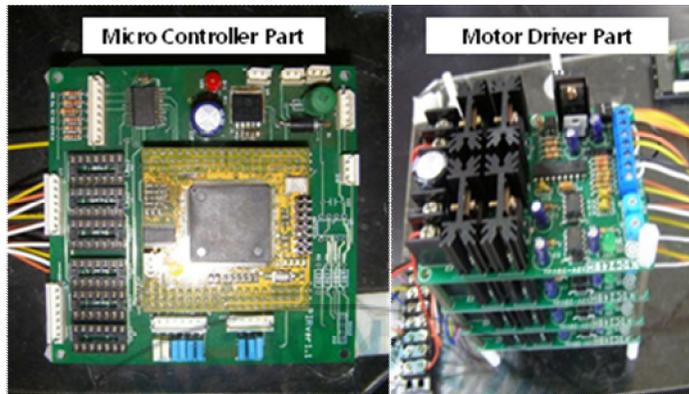


Fig. 2.11 Micro Controller & Motor Driver Parts

엑츄에이터부는 6개의 바퀴와 DC모터 6개로 구성되어 있다. 즉 각각의 DC모터에 바퀴가 장착되어 구동하게 되며 Fig. 2.12에 나타나 있다. 모터는 24V DC모터를 사용하며 기어박스를 연결한 후 모터의 최대회전은 62rpm이다. 바퀴는 바퀴프레임과 고무 바퀴로 구성되어있다.

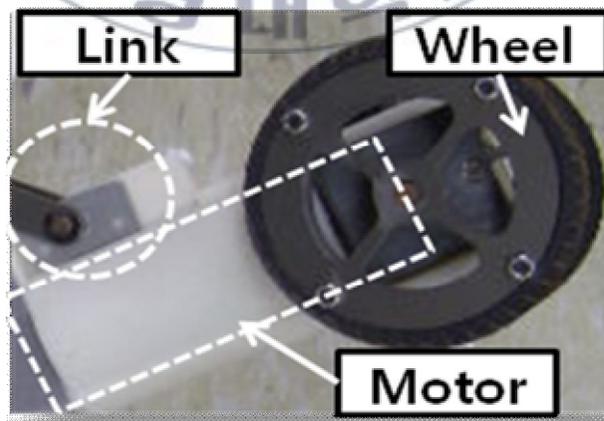


Fig. 2.12 Actuator

마지막으로 센서부는 Fig. 2.13에 나타나있으며 바퀴의 각속도를 측정하기 위한 3개의 엔코더, 곡관부와 배관탐사робот 사이의 거리를 측정하기 위한 3개의 적외선 센서와 배관내의 상태를 촬영하기 위한 카메라로 구성되어 있다. 엔코더는 모터와 일체형으로 제작되어 있으며, 적외선 센서는 Fig. 2.13과 같이 로봇의 앞부분에 위치하여 로봇과 주행방향의 벽면 사이의 거리를 측정한다. 적외선 센서는 10cm ~ 80cm 까지 거리측정이 가능하며 카메라 센서는 CMOS 타입의 카메라센서이며 수동으로 원근조절이 가능하다.

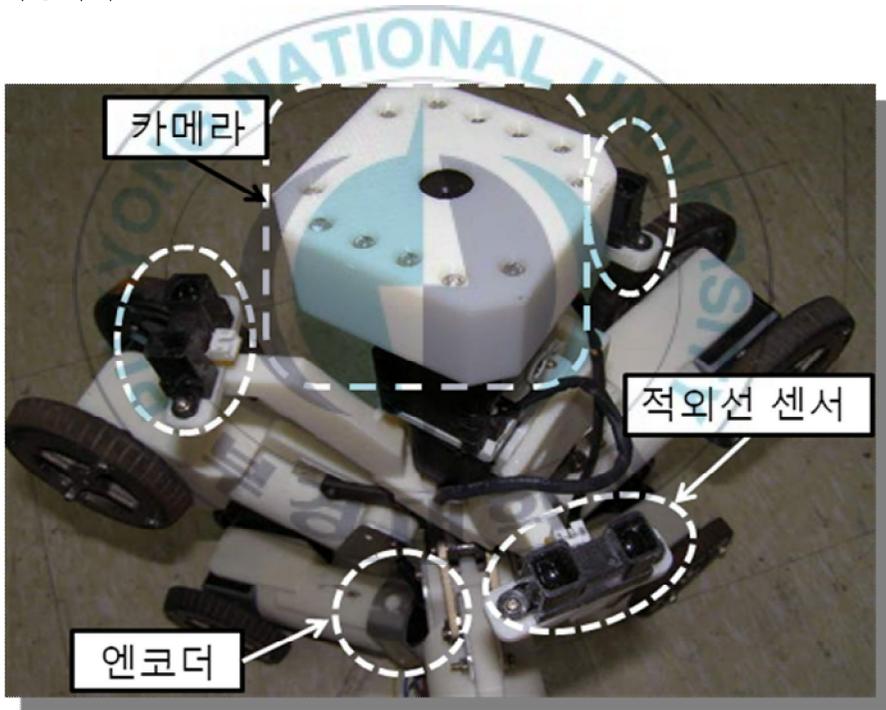


Fig. 2.13 Installation of Sensor Module

제 3 장 곡관 주행 알고리즘

배관 탐사로봇은 직관에서 구동을 제외한 공간, 특히 곡관에서 구동을 할 경우, 각 바퀴를 차동구동하여 이동해야 한다. 그 이유는 모터 부하 및 슬립을 방지하기 위함이다. 하지만 6개의 바퀴모두가 벽면에 밀착하지 않는 경우가 발생하며, 이로 인해 모터의 추진력이 부족할 경우 슬립이 발생하면서 그 속에 갇히게 된다. 충분한 추진력이 모터로부터 발생한다는 가정하에 곡관인식의 중요성을 알아보고 곡관인식을 위한 적외선 센서 이용법과 이를 사용하여 곡관 내에서 원활한 구동이 이루어질 수 있는지 시뮬레이션과 실험을 비교하여 검증한다.

3.1 곡관 인식의 필요성

일반적으로 일정한 직선을 따라 운동하는 이동로봇을 살펴보면 4개의 바퀴가 모두 같은 속도로 움직이면 아무런 문제 없이 이동하게 된다. 하지만 곡선을 만나면 곡선의 곡률반경에 따라 곡률중심의 안쪽으로 위치한 바퀴와 바깥쪽으로 위치한 바퀴의 속도를 달리해야 한다.

Fig. 3.1은 배관탐사роб트의 곡선 주행 원리를 나타내고 있다.

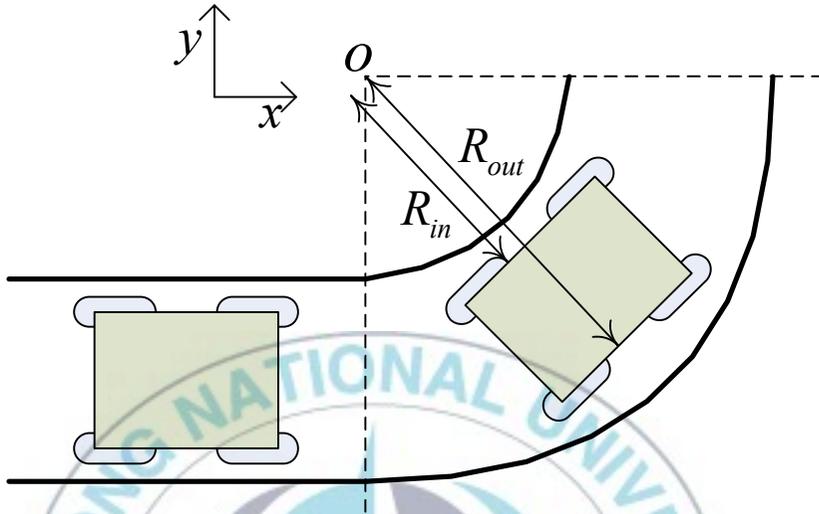


Fig. 3.1 Driving Principle of Inpipe Inspection Robot

곡률중심 O 에서 각 바퀴까지의 거리 R_{in} , R_{out} 사이의 거리비에 반비례하는 각속도비를 바퀴에 입력해야 곡선을 원활히 주행하게 된다. 다시 말해서 안쪽에 위치한 바퀴의 각속도는 바깥쪽에 위치한 바퀴보다 작아야 주어진 곡선 경로에 맞추어 이동하게 된다. 차동구동을 하는 이동로봇의 조건은 바퀴와 지면 사이에 슬립이 없다는 가정이 필요하다.

이에 비해 배관탐사로봇은 보다 특수한 환경에서 주행하게 된다. 배관과 같은 원통형에서의 구동은 일반차량의 곡선 주행원리와 비슷하다. 즉 곡관의 곡률중심에서 각 바퀴까지의 거리비가 각 바퀴의 각속도비에 연관성을 띄고 있다.

이러한 원리를 이용하지 않을 경우 곡률반경이 작은 쪽에 위치한 바퀴는 연속적인 미끄러짐이 발생하게 되고 큰 쪽에 위치한 바퀴는 끌려 다니게 된다. 따라서 모터의 부하가 발생하고 기어와

같은 기구적 부분의 손상이 발생하게 되어 관내 주행의 불안요소가 된다. 이를 방지하기 위해서는 배관 탐사로봇이 곡관에 도달했을 때 곡관 진행방향에 따른 각 바퀴의 위치를 알아야 하며, 이 위치 정보를 이용하여 차동구동을 하게 된다.

3.2 곡관 주행을 위한 알고리즘

배관속에 위치한 배관탐사로봇 각 바퀴의 임의의 위치를 알아내기 위해서는 먼저 배관 벽면에 접촉한 바퀴의 주행 궤적을 알아야만 한다. 이때 배관탐사로봇의 세바퀴가 배관벽면과 접촉할 때 바퀴중심점 P, Q, R 을 알면 이 세점을 지나는 원의 궤적을 알 수 있다.

Curve T는 P, Q, R 을 포함하는 평면과 곡관과의 교차 곡선이다. 배관탐사로봇은 120° 로 로봇의 중심축에서 수직인 방사형 구조의 구동모듈을 가지므로 배관면에 닿는 각 바퀴의 접촉점과 Curve T는 동일 평면상에 위치하며 단지 P, Q, R 의 위치만 임의로 변할 뿐이다. 그러므로 Curve T의 식을 알면 벽면과 접촉해있는 세점의 위치를 알게 되고 주행 궤적을 구할 수 있게 된다. 주행 궤적을 산출하면 곡관에서 주행할 때의 각 바퀴의 속도비를 결정할 수 있다.

하지만 Curve T의 식을 유도하는 것은 매우 복잡하고 어렵다. 그래서 각 바퀴에서 곡관 내부 벽면까지의 거리비를 이용하여 각 바퀴의 속도비를 결정한다.

Fig. 3.2는 배관 속에서 곡률중심 z 축에서 각 바퀴까지의 거리를 나타내고 있다.

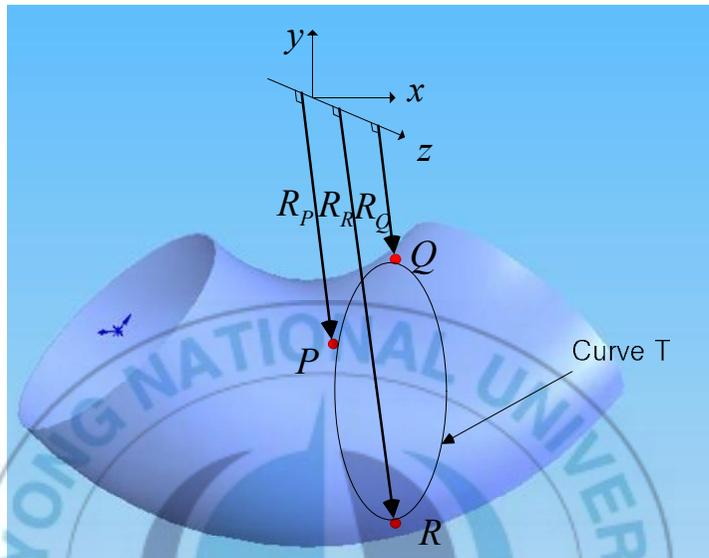


Fig. 3.2 Position of Wheels in Elbow

여기서 곡관 진입직전 각 바퀴의 위치를 P, Q, R 로 나타내고 곡관의 곡률중심에서 각 바퀴가 위치한 수직까지의 거리가 R_p, R_q, R_r 으로 나타내며 R_p, R_q, R_r 의 거리비가 각 바퀴의 속도비와 같음을 알 수 있다.

위에서 배관탐사로봇 각 바퀴의 곡률반경비가 속도비와 같음을 확인하였으므로 곡률비를 구하기 위한 알고리즘을 필요로 한다. 이는 배관탐사로봇 전방부에 부착된 적외선센서에서 벽면까지의 거리를 통해 확인할 수 있다.

Fig. 3.3은 적외선센서로부터 벽면까지의 거리 I_p, I_q, I_r 를 나타낸 것이다.

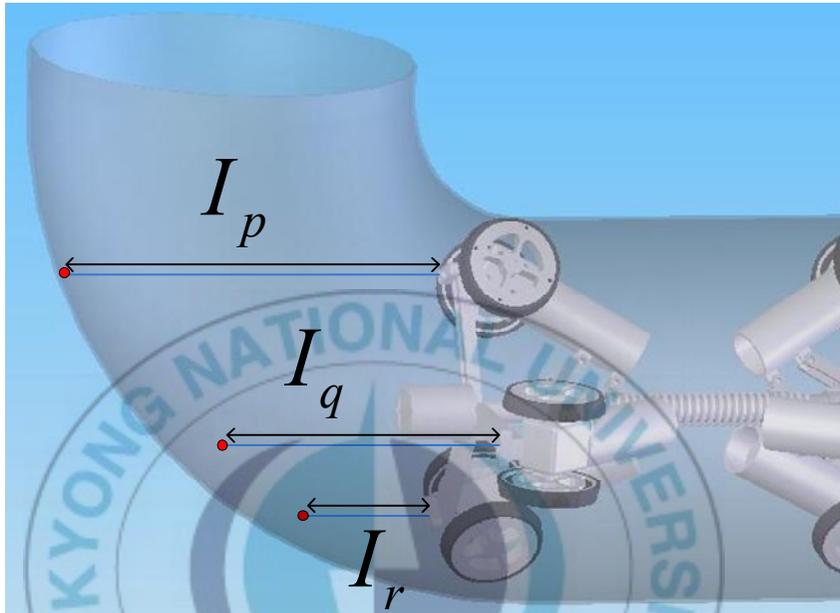


Fig. 3.3 Distance between Sensor and Pipeline

I_p, I_q, I_r 의 값은 배관 탐사로봇이 곡관과 일정한 거리 a 에 도달하면 측정된다. 3D 설계 툴을 사용하여 적외선 센서로부터 벽면까지의 거리는 다음과 같다.

$$\begin{cases} I_p = a \times \sin \varphi + b \\ I_q = a \times \sin(\varphi + \frac{2}{3} \pi) + b \\ I_r = a \times \sin(\varphi + \frac{4}{3} \pi) + b \end{cases} \quad (3.1)$$

여기서 a, b 는 곡관반경의 크기에 따라 결정되는 상수이며 설계 툴을 사용하여 시뮬레이션에 의해 결정된다. 각각의 $I_i (i = p, q, r)$ 를 비교해 보면 120° 의 위상차를 유지한다는 것을 알 수 있다. 곡률반경 R_p, R_q, R_r 과 센서에서 벽면까지의 거리 I_p, I_q, I_r 는 위상이 $-\pi$ 만큼 차이가 나지만 크기와 주기가 같으므로 I_p, I_q, I_r 을 통해 R_p, R_q, R_r 의 비를 구할 수 있다.

Fig. 3.4은 곡관 속에서의 배관탐사로봇의 위치를 나타낸 것이다. 여기서 ϕ 값에 따른 각각의 I_p, I_q, I_r 값과 R_p, R_q, R_r 값을 알아보기 위해 곡관의 크기 및 곡관인식을 위한 임계거리 α 값을 임의로 정한 후, 3D툴을 사용하여 구하게 된다.

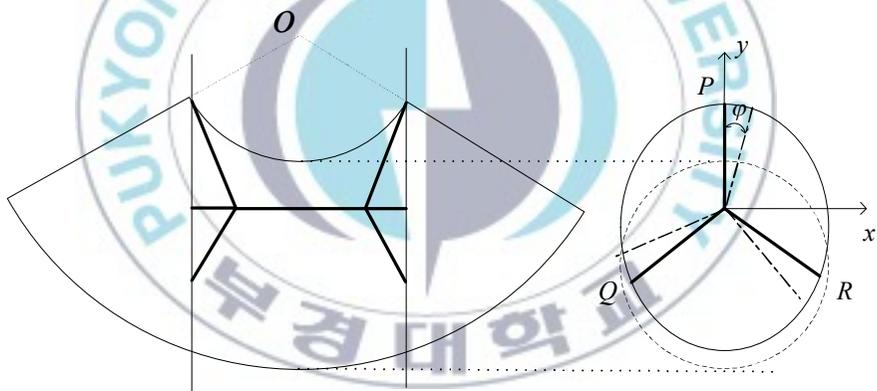


Fig. 3.4 Inpipe Inspection Robot in Elbow

아래 Fig. 3.5는 φ 값에 따른 각각의 I_p, I_q, I_r 의 값을 나타낸 것이다.

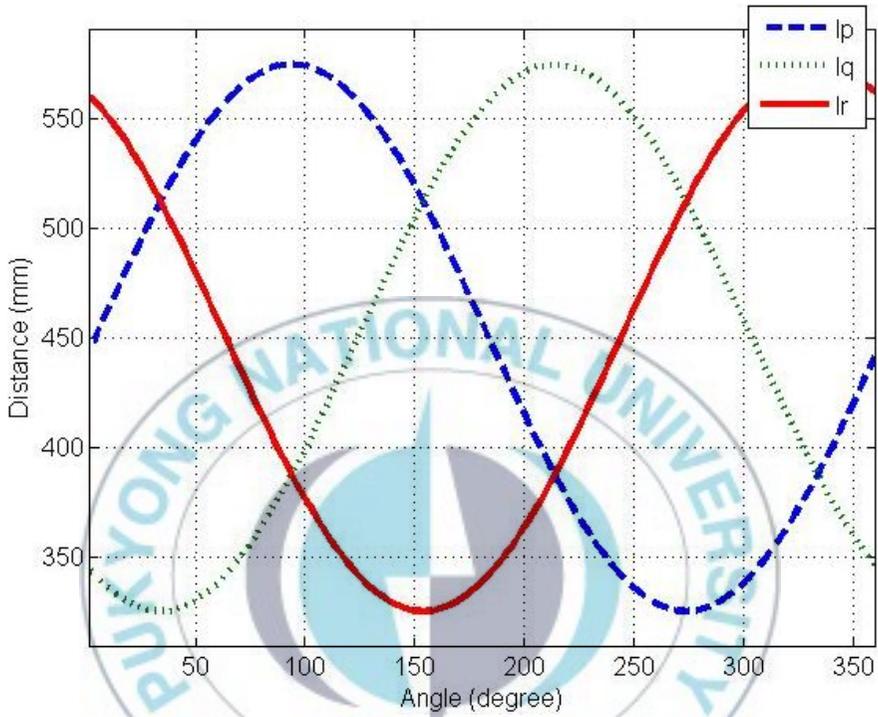


Fig. 3.5 Value of I_p, I_q, I_r

이 값들은 사인곡선을 그리며 세 개의 곡선이 $-\frac{2}{3}\pi$ 만큼 위상차를 가지는 것을 확인할 수 있다.

아래 Fig. 3.6은 φ 값에 따른 각각의 R_p , R_q , R_r 의 값을 나타낸 것이다.

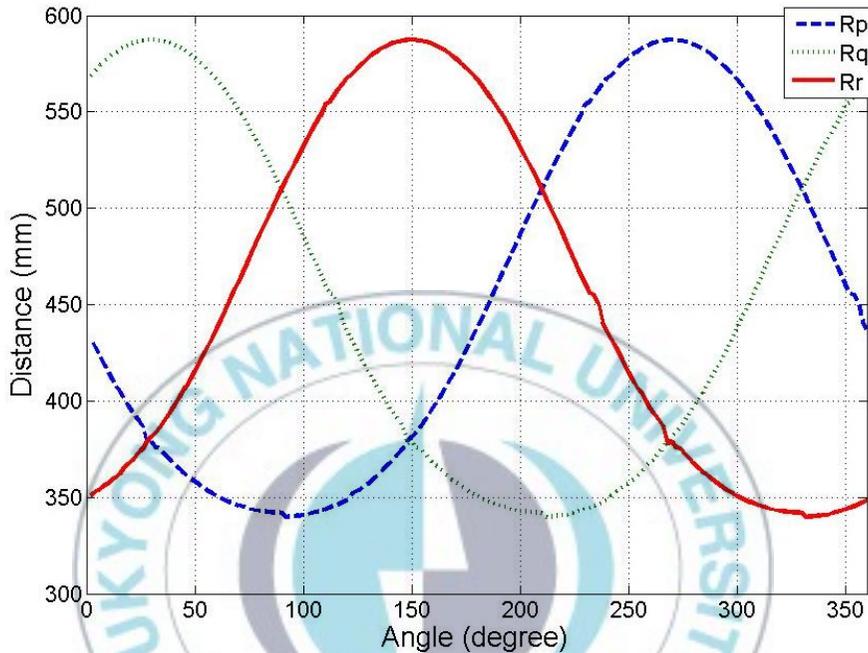


Fig. 3.6 Value of R_p , R_q , R_r

위 그림 또한 일정한 패턴의 사인 곡선을 그리며 3개의 곡선이 $-\frac{2}{3}\pi$ 만큼 위상차를 가지는 것을 확인할 수 있다. 위의 두 그림을 비교해 보면 (I_p, R_p) , (I_q, R_q) , (I_r, R_r) 는 서로 $-\pi$ 만큼의 위상차가 있으며 $-\pi$ 만큼 위상을 이동시키면 동일함을 알 수 있다. 즉, I_p , I_q , I_r 의 값을 사용하여 R_p , R_q , R_r 의 비를 구할 수 있다.

아래 Fig. 3.8은 배관직경 300mm에서의 φ 값에 따른 거리 값을 나타낸 것이다.

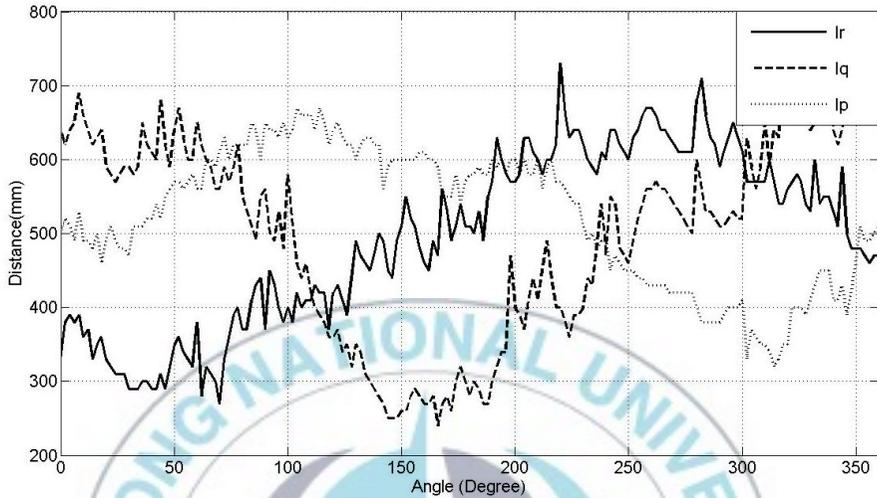


Fig. 3.7 Value of data from Infrared Sensor

이 값을 사용하여 배관탐사로봇이 곡관속을 주행할 때 모터의 각속도비를 계산할 것이다.

지금까지 적외선 센서값(I_p, I_q, I_r)에 의해 계산 되어진 각속도비 ω_{w_i} ($i=1, 2, 3$) 는 곡관 곡률반경의 중심에서 각 바퀴 까지의 거리 R_i ($i=p, q, r$)에 반비례함을 알아 보았다.

Fig. 3.8로 부터 각 바퀴의 각속도와 곡률중심(O)에 대한 각 바퀴의 선속도 관계를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} v_1 &= R_p \omega_C = r_w \omega_{W_1} \\ v_2 &= R_q \omega_C = r_w \omega_{W_2} \\ v_3 &= R_r \omega_C = r_w \omega_{W_3} \end{aligned} \quad (3.3)$$

여기서 v_i , ω_{W_i} ($i=1, 2, 3$), R_j ($j=p, q, r$)는 각각 바퀴의 선속도, 각속도 및 곡률중심에서 바퀴까지의 거리이며, ω_C 는 곡률중심에 대한 각 바퀴의 각속도이며 r_w 는 바퀴의 반지름이다.

식(3.3)으로부터 각 바퀴의 각속도는 식(3.4)로 정리된다.

$$\begin{aligned} \omega_{W_1} &= \frac{R_p}{r_w} \omega_C \\ \omega_{W_2} &= \frac{R_q}{r_w} \omega_C \\ \omega_{W_3} &= \frac{R_r}{r_w} \omega_C \end{aligned} \quad (3.4)$$

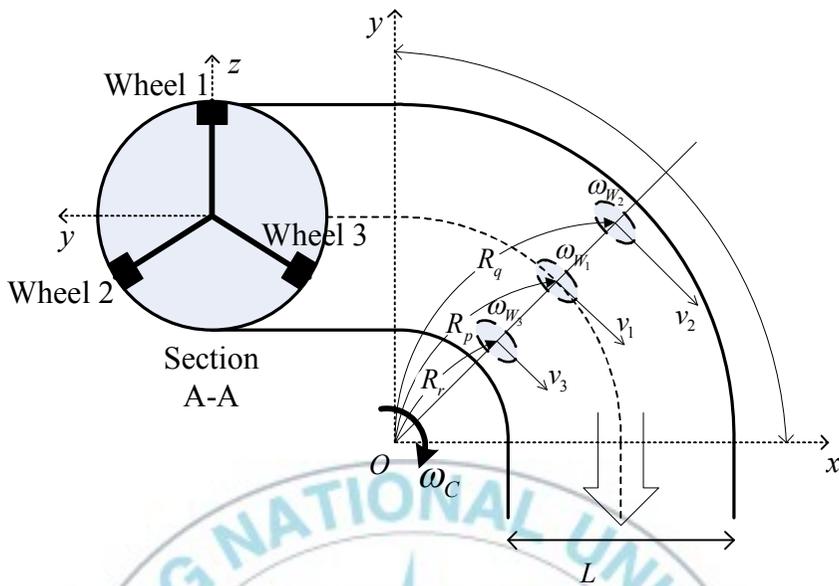


Fig. 3.8 Relation between ω_i and R_i

여기서 v_i , ω_{w_i} ($i=1, 2, 3$), R_j ($j=p, q, r$) 는 각각 바퀴의 선속도, 각속도 및 곡률중심에서 바퀴까지의 거리이며, ω_C 는 곡률중심에 대한 각 바퀴의 각속도이며 r_w 는 바퀴의 반지름이다.

Fig. 3.8은 곡관주행을 위한 순서도를 나타낸 것이다. 배관속을 주행하는 배관탐사로봇은 임계값 α 에 도달할 때까지 계속해서 I_p, I_q, I_r 값을 감지하게 된다. 이 α 보다 작아질 때 배관탐사 로봇은 곡관에 도달한 시점이 된다. 적외선센서로부터 읽어 들인 I_p, I_q, I_r 값을 이용하여 R_p, R_q, R_r 의 비를 구할 수 있으며, 이것을 이용하여 각 바퀴의 각속도비를 구할 수 있게된다. 그 후 배관탐사로봇은 곡관을 주행하면서 계속해서 거리값을 읽어들이고 I_p, I_q, I_r 가 α 보다 커질 때 곡관주행이 끝나는 시점이된다. 여기서 α 는 실험적으로 구해지는 값이다.



Fig. 3.9 Sequence of Driving Curvature Pipeline Algorithm

제 4 장 모터의 모델링과 제어기 설계

배관 탐사로봇은 배관의 형태변화에도 관내에서 일정한 속도로 이동할 수 있어야 한다. 그러기 위해서 배관 탐사로봇과 벽면 사이의 압착력은 일정하다는 전제하에 로봇의 바퀴에 적절한 속도값을 주어야 한다. 본 연구에서 배관의 형태 변화에 따라 제어가 가능한 배관 탐사로봇의 구조를 2장에서 제시하였다.

이러한 배관 탐사로봇의 속도를 제어하기 위해서 본 장에서는 모터의 모델링을 제시하고 제어기를 설계한다. 본 연구에서 사용된 모든 모터는 동일하므로 하나의 모터에 대한 모델링을 제시하여 모두 동일하게 적용한다.

4.1 모터 모델링

모터모델링은 Fig. 4.1에 나타나있다.

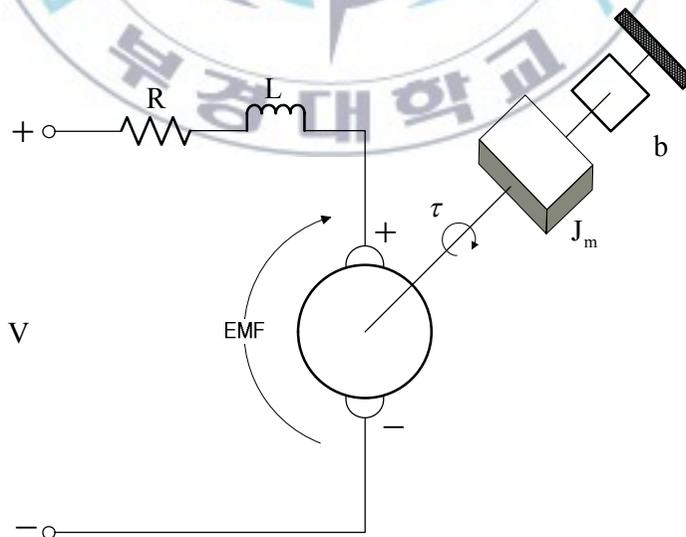


Fig. 4.1 Model of DC Motor

Table 4.1 Motor Parameters

Physical parameters	Values	Unit
<i>Moment of inertia of the rotor(J)</i>	0.01	$kg \cdot m^2 / s^2$
<i>Damping ratio of the mechanical system(b)</i>	0.1	<i>Nms</i>
<i>Electromotive force constant(K = K_m = K_b)</i>	0.01	$N \cdot m / Amp$
<i>Electric resistance(R)</i>	1	Ω
<i>Electric inductance(L)</i>	0.5	<i>H</i>

J_m = 모터와 모터축에 걸리는 부하에 의한 등가 관성모멘트 [$kg \cdot m^2$]

q = 모터축의 각변위 [rad]

K_m = 모터상수

K_b = 역기전력상수

b = 모터점성마찰계수 [$N \cdot m / (rad / s)$]

t = 모터토크 [$N \cdot m$]

T_a = 부하토크 [$N \cdot m$]

L = 전기자인덕턴스 [H]

R = 전 = 기자저항 [Ω]

V = 전기자전압 [V]

i = 전기자전류 [A]

V_{emf} = 역기전력 [V]

토크(T)와 역기전력(e)는 식(4.1)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} T &= K_m i \\ V_{emf} &= K_b \dot{\theta} \end{aligned} \quad (4.1)$$

여기서 K_m 와 K_b 는 동일한 값이라고 가정한다.

Fig. 4.1에서 DC모터의 전기적 특성과 기계적 특성을 Newton's law와 Kirchoff's law를 이용하면, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$J\ddot{\theta} + b\dot{\theta} + T_a = K_m i \quad (4.2)$$

$$L \frac{di}{dt} + Ri = V - K_b \dot{\theta} \quad (4.3)$$

여기서 각 변수에 대한 설명은 아래와 같다.

식(4.2)과 (4.3)을 이용하여, 무 부하 시 전달함수를 구하면 다음과 같다.

$$G(s) = \frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{\frac{K_m}{J_m L}}{(s + \frac{R}{L})(s + \frac{b}{J_m})} \quad (4.4)$$

4.2 제어기 설계 및 실험

본 절에서는 모터의 실제 각속도가 목표 각속도를 추적하게 하기 위한 PID제어기를 사용한 제어 입력 $u(t)$ 를 다음과 같이 설계한다.

$$u(t) = V = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4.5)$$

$$e(t) = \omega_{ref} - \omega \quad (4.6)$$

여기서 K_p , K_i , K_d 는 PID 제어기의 게인들이며 ω_{ref} , ω 는 각각 바퀴의 기준 각속도 및 실제 각속도이다.

Fig. 4.2는 본 연구를 위해 제작된 바퀴의 각속도를 제어하기 위한 배관 탐사로봇의 PID 제어기 블록선도이다.

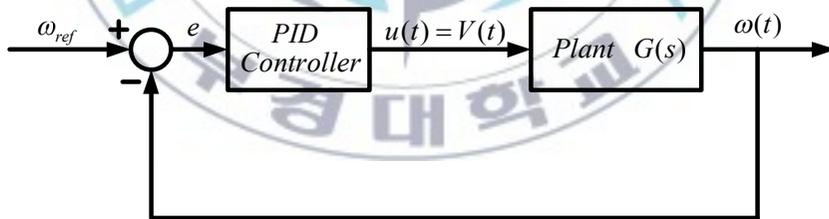


Fig. 4.2 Block Diagram of PID Controller

Fig. 4.3 은 설계된 *PID* 제어를 바탕으로 시뮬레이션한 결과를 나타내고 있다. $1s \sim 6s$ 까지 $3.35rad/s$, $6s \sim 10s$ 까지 $2.09rad/s$ 의 기준 각속도를 추종하고 있다. 그 결과 응답속도(Response time)는 $0.56s$ 로 만족할만한 결과를 얻었고 정상상태(Stead State)는 $1.2s$ 에 도달하였다.

특히, $4s$ 에서 외부 토크 외란(Pulse disturbance)을 주었을 때에도 문제없이 각속도를 추정하였다.

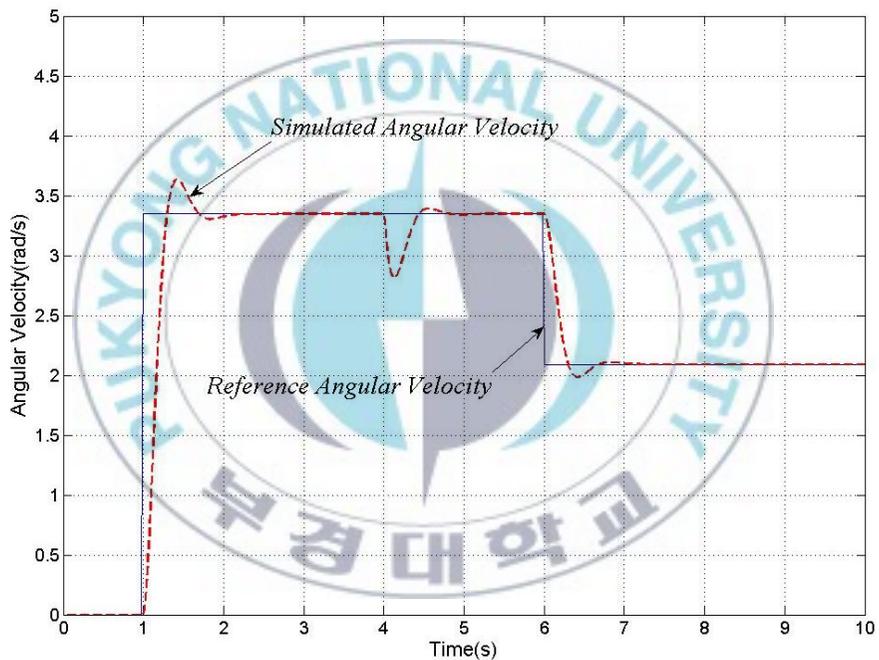


Fig. 4.3 Wheel Angular Velocity using PID Controller

제 5 장 시뮬레이션 및 실험 결과

본 장에서는 제안된 모터의 모델링과 제어기의 유효성을 입증하기 위해 *Matlab* 을 이용한 시뮬레이션과 배관에서의 실험 결과를 제시한다.

5.1 시뮬레이션 결과

우선 시뮬레이션을 위한 배관의 길이 및 지름을 정의하고 몇몇 조건들의 가정을 제시한다. 시뮬레이션에서 정의된 가정들은 다음과 같다.

- i. 배관탐사로봇의 바퀴와 배관벽면 사이에 미끄러짐은 없다.
- ii. 배관탐사로봇의 *Wheel 1* 과 y 축이 이루는 각도 φ 는 90° 이며 배관을 주행하는 동안 변하지 않는다.

Fig. 5.1 은 시뮬레이션에 사용할 배관의 형태와 초기 진입 시 로봇의 자세를 나타내고 있다.

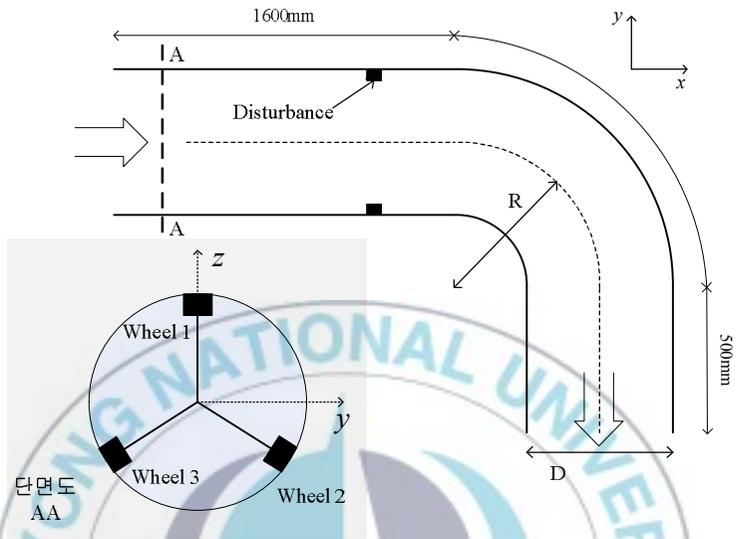


Fig. 5.1 Path of Inpipe Inspection Robot

Photo 5.1 은 실제 실험배관과 초기 로봇의 자세를 나타낸다.



Photo 5.1 Real Experimental Pipeline System

시뮬레이션에 사용할 배관의 크기는 실제 실험에서 사용할 배관과 동일한 크기이며 시뮬레이션에서는 직관부에서 토크외란 (Impulse Torque Disturbance)을 가정하여 제어기의 성능을 검증할 것이다.

Table 5.1 는 배관탐사робот의 매개변수의 수치값을 나타내고, φ 는 배관 탐사робот이 배관을 진입할 때 *Wheel 1*이 z 축과 이루는 각도, D 은 배관의 지름, R 는 곡관의 곡률반경을 나타낸다.

Table 5.1 The Numeric Value of Parameters for Simulation

Parameter	Value	Unit
φ	0	[deg]
D	0.3	[m]
R	0.3	[m]
a	-150	.
b	300	.
ω_{ref}	4.0	[rad / s]
Sampling Time	0.01	Second

먼저, 배관탐사робот의 기준 주행각속도는 직관에서는 *wheel* 에 관계없이 $4.0rad/s$ 로 하였고, 곡관에서는 *wheel 1* 은 $4.0rad/s$, *wheel 2* 는 $5.73rad/s$, *wheel 3* 는 $2.25rad/s$ 로 하였다. 이는 바퀴의 최대 회전각속도($6.49rad/s$)에서 배관을 탐사하기 위한 최적의 각속도를 임의로 정하였다. 배관탐사робот은 $1.6m$ 의 직선 배관을 지난 후 곡관에 진입하게 된다. 배관탐사робот이 곡관에 진입과

동시에 곡관 주행알고리즘에 의해서 바퀴의 각속도비가 결정되고 곡관주행을 하게 된다. 곡관주행이 끝나면 다시 0.5m의 직선배관을 거쳐 시뮬레이션을 마치게 된다. 시뮬레이션에서 11 초에 외란을 주어 제어기의 성능을 검증한다.

Figs. 5.2~5.4 는 제어기 입력인 $Wheel\ i(i=1, 2, 3)$ 의 기준 각속도(Reference Angular Velocity)와 PID 제어기에 의한 시뮬레이션된 바퀴의 각속도 (Simulated Angular Velocity)를 나타내고 있다. 시뮬레이션 결과는 정착시간(Settling time)이 0.7s 이며 그 후 기준각속도 $4.0rad/s$ 를 추적하고 있음을 알 수 있다. 즉, 직관에서는 세 바퀴의 각속도가 목표 각속도 $4.0rad/s$ 를 잘 추적하고 있고, 곡관에서는 $Wheel\ i(i=1, 2, 3)$ 의 각속도가 각각 $4.0rad/s$, $5.73rad/s$, $2.25rad/s$ 에 잘 추적하고 있음을 보여준다. 그리고 $Wheel\ 2$ 의 각속도가 $Wheel\ 3$ 의 각속도보다 크므로 우회전하고 있음을 보여준다.

Figs. 5.5~5.7 은 $Wheel\ i(i=1, 2, 3)$ 의 각속도추적오차를 나타낸 것이다. 각 바퀴의 각속도 추적오차는 운동형태가 변경되는 시점을 제외하고 영으로 수렴됨을 보여준다. 이것은 관로탐사로봇의 각속도가 기준 각속도에 잘 추적하고 있음을 나타낸다.

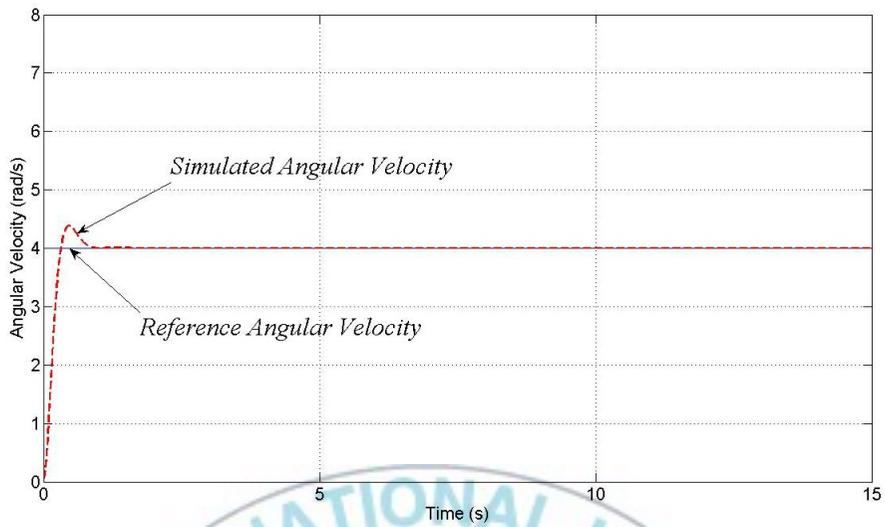


Fig. 5.2 Simulated Angular Velocity of *Wheel 1*

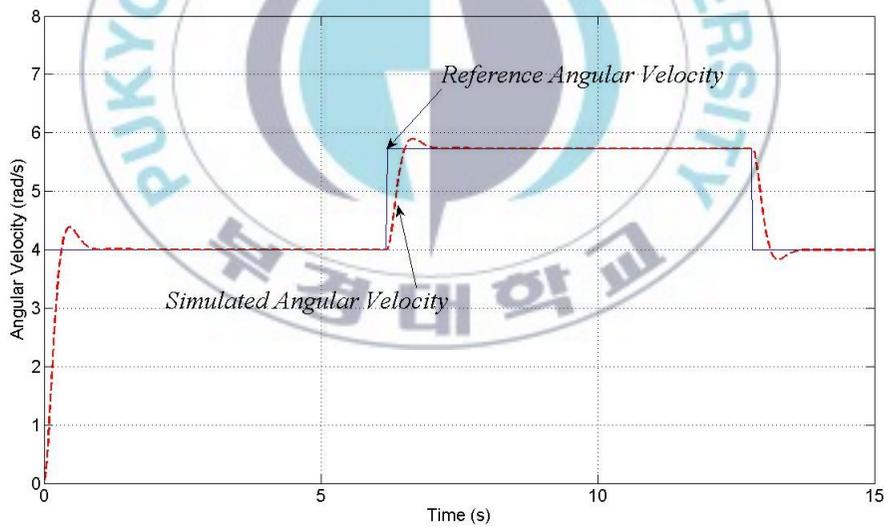


Fig. 5.3 Simulated Angular Velocity of *Wheel 2*

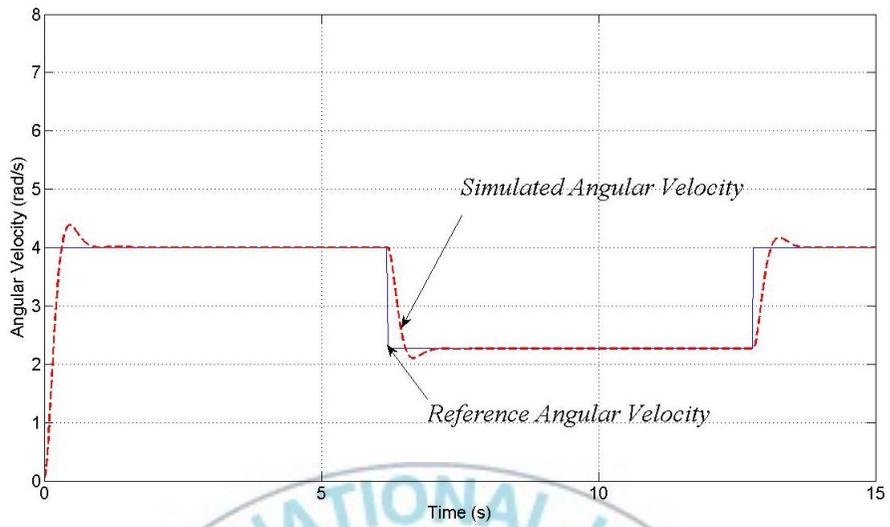


Fig. 5.4 Simulated Angular Velocity of *Wheel 3*

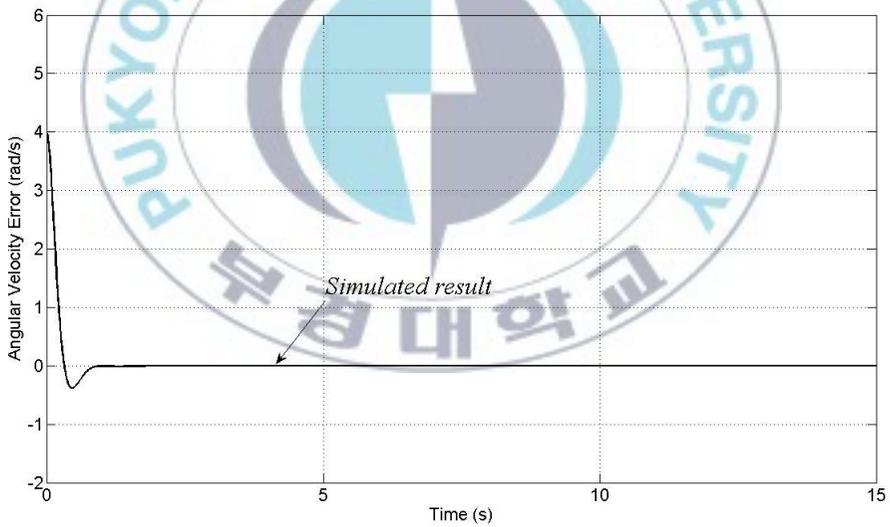


Fig. 5.5 Angular Velocity Error $Error(e_1)$ of *Wheel 1*



Fig. 5.6 Angular Velocity Error $Error(e_2)$ of Wheel 2

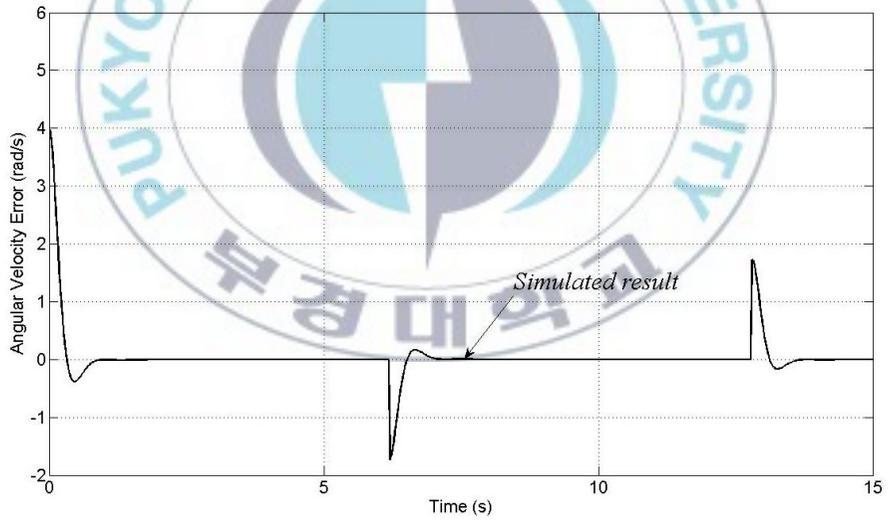


Fig. 5.7 Angular Velocity Error $Error(e_3)$ of Wheel 3

5.2 실험 결과

Figs. 5.8은 적외선센서의 시간별 거리값 (I_p , I_q , I_r) 을 나타내며 P 점은 임계값 $\alpha = 0.5m$ 에서 곡관인식이 이루어짐을 나타내었다. 여기서 배관탐사로봇이 초기 직관주행구간에서는 적외선 센서값이 $0.5m$ 이상이고 곡관부에 도달하는 시점(P)부터 곡관주행동안 $0.5m$ 이하의 값을 나타냄을 알 수 있으므로 임계값 $\alpha = 0.5m$ 로 설정하였다.

Figs. 5.9~5.11은 배관탐사로봇의 각 바퀴들이 기준속도를 추적하기 위해 설계된 PID제어기를 적용한 실험결과들을 나타낸다. Fig. 5.9는 배관탐사로봇의 중간바퀴인 *Wheel 1* 의 각속도에 대한 실험결과를 나타낸다. 목표속도에 빠른 응답속도를 보이며 정착시간은 약 3s이다. *Wheel 1* 의 각속도에 대한 실험결과는 배관 형태가 변경되는 지점을 제외하고 시뮬레이션결과인 전체실험 시간에서 4.0 rad/s 주위로 약 $\pm 0.4 \text{ rad/s}$ 로 변동하고 있음을 보여준다. Fig. 5.10은 바깥바퀴인 *Wheel 2* 의 각속도에 대한 실험결과를 나타내며, *Wheel 2* 의 각속도에 대한 실험결과는 배관 형태가 변경되는 지점을 제외하고 직관주행구간에서는 시뮬레이션결과 4.0 rad/s 주위로 약 $\pm 0.3 \text{ rad/s}$ 로 변동하고 있음을 보여주며, 곡관주행구간에서는 시뮬레이션결과 5.2 rad/s 주위로 약 $\pm 0.3 \text{ rad/s}$ 로 변동하고 있음을 보여준다. 그리고 약 6.2s에서 곡관주행이 시작되며 12.5s에서 곡관주행이 끝남을 보여준다. 이 곡관주행구간에서의 각속도에 대한 실험결과는 시뮬레이션결과 5.73 rad/s 보다 낮은 약 $5.2 \pm 0.3 \text{ rad/s}$ 로 변동하고 있음을 보여준다. Fig. 5.11은 안쪽바퀴인 *Wheel 3* 의 각속도에 대한 실험결과를 나타내며, 실험결과는 배관형태가 변경되는 지점을 제외하고 직관주행구간에서는 시뮬레이션결과 4.0 rad/s 주위로 약 $\pm 0.3 \text{ rad/s}$ 로 변동하고 있음을

보여주며, 곡관주행구간에서는 *Wheel3*의 각속도에 대한 실험결과는 시뮬레이션결과 2.25 rad/s 주위로 0.4 rad/s 로 변동하고 있음을 보여준다. 약 6.2s에서 곡관주행이 시작되며 12.5s에서 곡관주행이 끝남을 보여준다. 이상과 같이 직관주행구간에서는 $4.0 \text{ rad/s} \pm 0.3 \text{ rad/s}$ 으로 같은 속도를 가지므로 직선주행하고 있음을 보여주며, 곡관주행구간에서는 *Wheel2*의 각속도가 *Wheel3*의 각속도보다 크므로 우회전하고 있음을 보여준다.

Fig. 5.12~5.14는 각 바퀴들의 각속도 오차에 대한 실험결과를 나타낸다. Fig. 5.12는 *Wheel1*의 각속도 오차를 보여주며 3초후 각속도오차가 $0 \pm 0.45 \text{ rad/s}$ 이며, Fig. 5.13은 *Wheel2*의 각속도 오차를 보여주며 직관주행 구간에서의 오차들은 $0 \pm 0.3 \text{ rad/s}$, 곡관주행구간에서의 각속도 오차는 $0.5 \pm 0.3 \text{ rad/s}$ 를 보여주고 있음을 알 수 있다. Fig. 5.14는 *Wheel3*의 각속도오차를 보여주며, 시작 시점과 곡관주행구간을 제외한 직관주행 구간에서의 각속도 오차는 $0 \pm 0.3 \text{ rad/s}$, 곡관주행 구간에서는 대체로 $-1 \sim 0.4 \text{ rad/s}$ 을 보여주고 있음을 알 수 있다. *Wheel2*의 각속도오차에 대한 실험결과는 시뮬레이션 결과보다 큼을 알 수 있다. 따라서 실제 실험시 곡관주행구간에서는 *Wheel2*의 각속도들을 좀더 높게 설정해야 함을 알 수 있다. 또한 세 바퀴의 각속도 오차들은 시작구간과 배관 현태가 변화하는 지점에서는 큰 오차가 발생하고 있음을 알 수 있다.

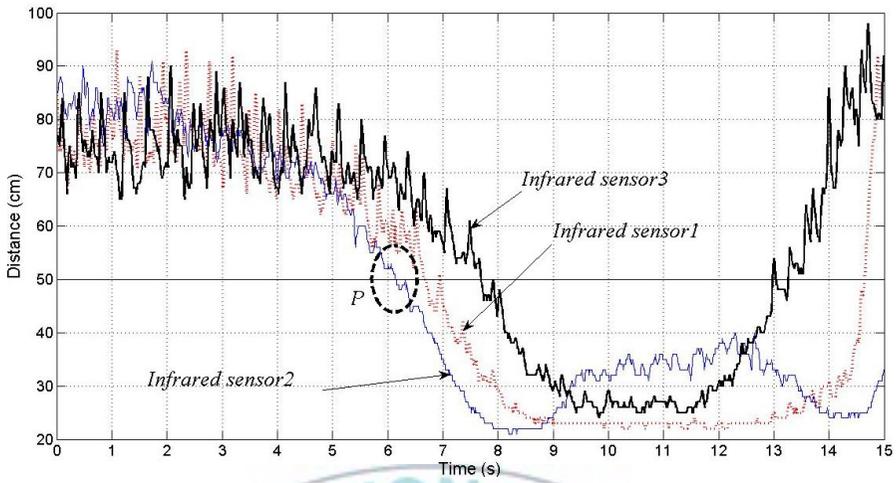


Fig. 5.8 Experimental Infrared Sensor Data (I_p , I_q , I_r)

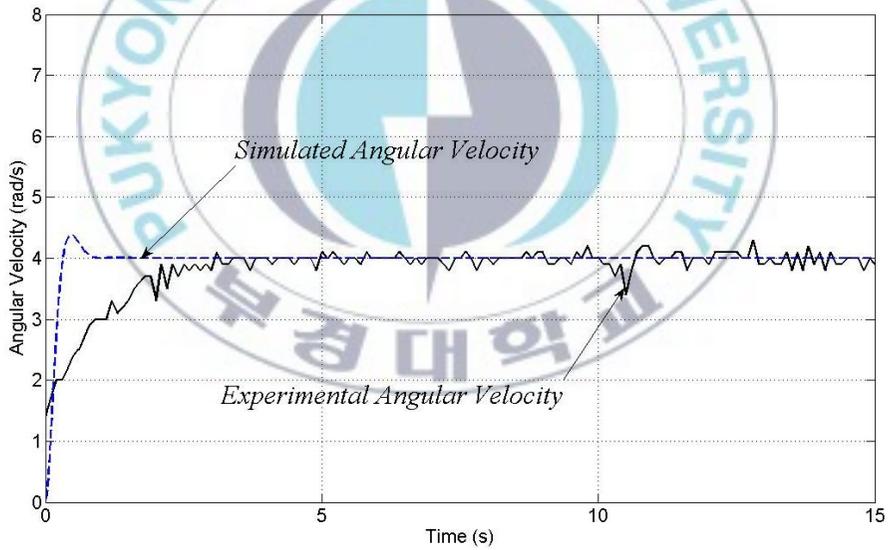


Fig. 5.9 Experimental Angular Velocity of *Wheel 1*

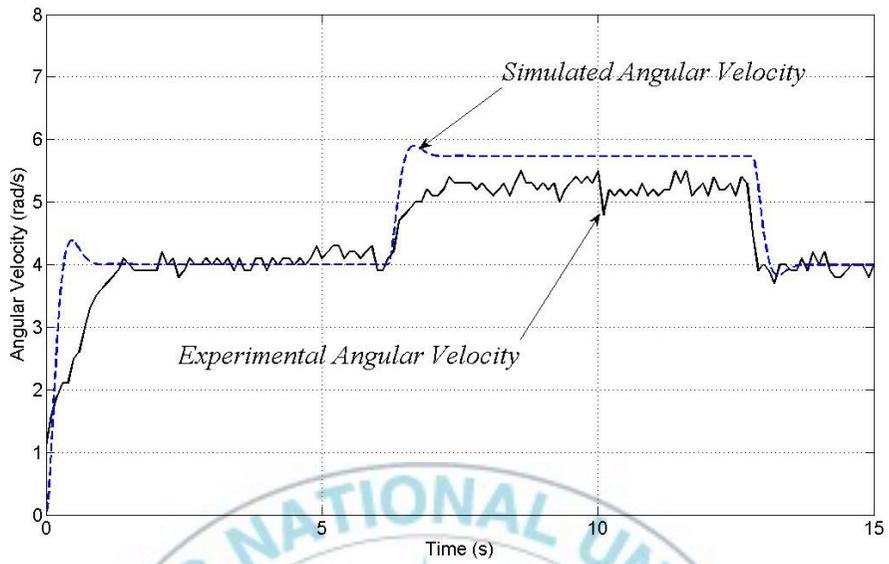


Fig. 5.10 Experimental Angular Velocity of Wheel 2

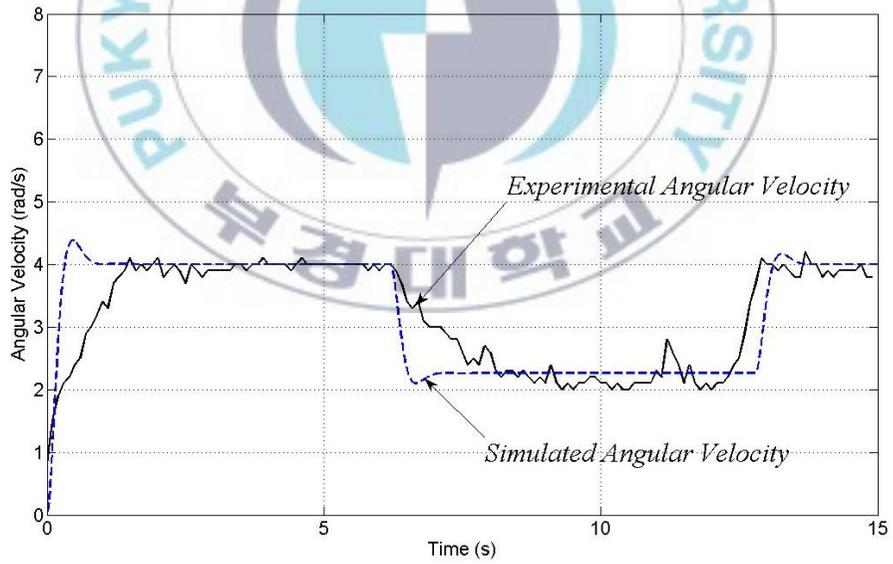


Fig. 5.11 Experimental Angular Velocity of Wheel 3

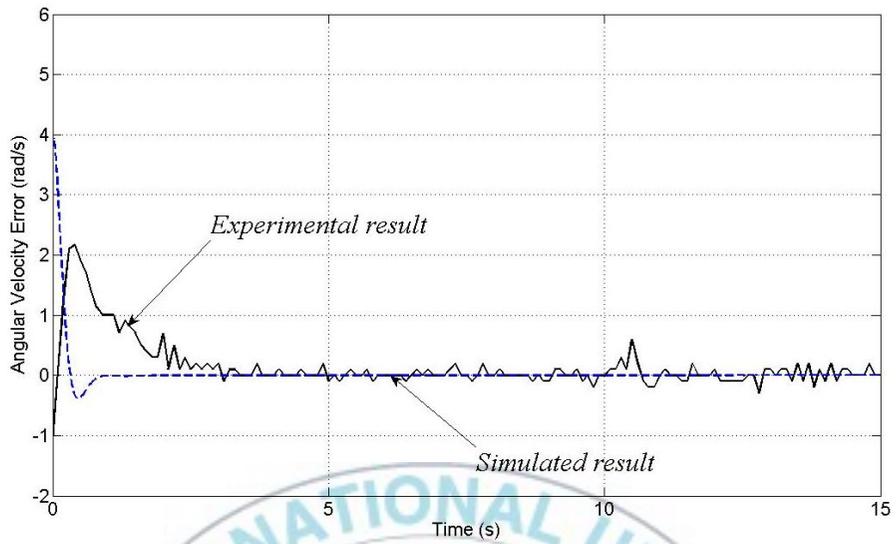


Fig. 5.12 Angular Velocity Error $Error(e_1)$ of Wheel 1

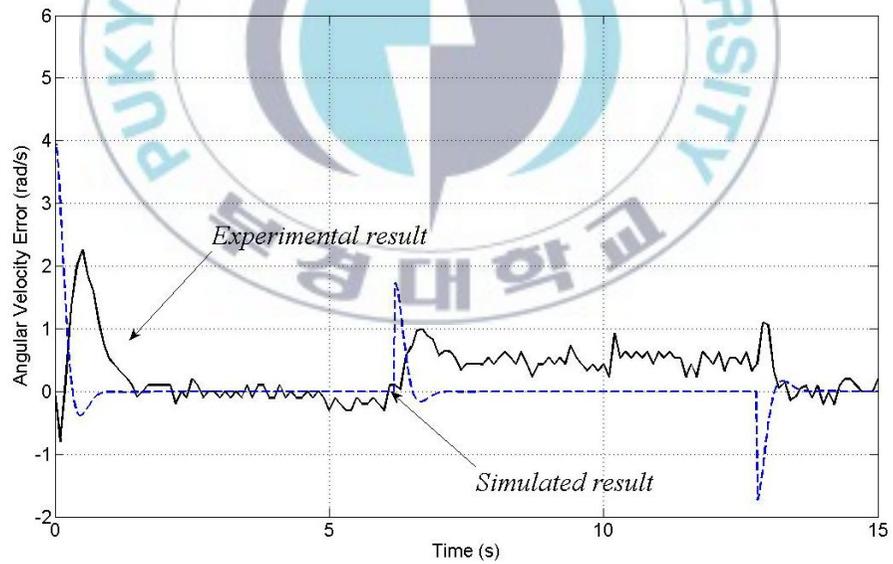


Fig. 5.13 Angular Velocity Error $Error(e_2)$ of Wheel 2

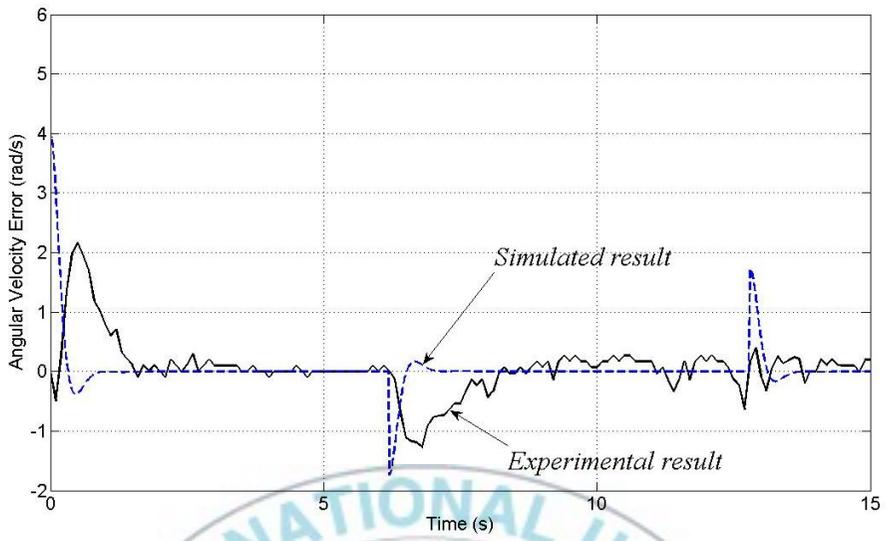
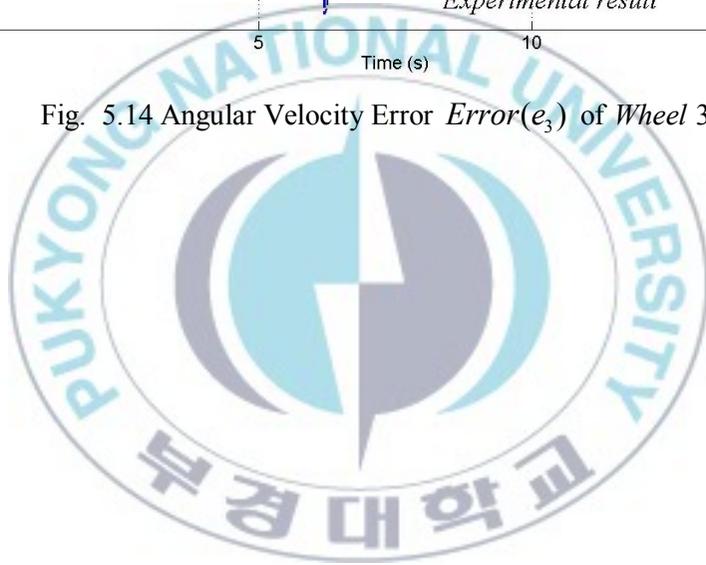


Fig. 5.14 Angular Velocity Error $Error(e_3)$ of Wheel 3



5.3 배관 주행 실험

배관탐사робот의 주행 실험은 내경0.3 m 배관을 대상으로 초기 직관을 주행한 후, 곡관을 거쳐 다시 직관을 지나게 된다. 배관 탐사робот의 주행실험은 5.1, 5.2절에서의 배관환경을 적용하였고 곡관부를 지나 직관부로 들어가는 지점을 수직배관으로 설정하였다. 배관의 내벽은 약간의 이물질과 모래가 존재하며, 모든 구간의 총 길이는 3.5m이다.

Fig. 5.15는 배관탐사робот의 주행과정을 나타내고 있다. 중심축에 설치된 스프링의 인장력에 의해 배관탐사робот의 바퀴는 배관벽면에 밀착하게 되고 직관부 및 곡관부에서 PID제어기를 적용하여 주행하게 된다. 또한 전방부에 설치된 카메라를 이용하여 배관의 상태정보를 얻고 있다. 실험 결과 직관, 곡관과 수직관에서 부드러운 주행을 하였다.

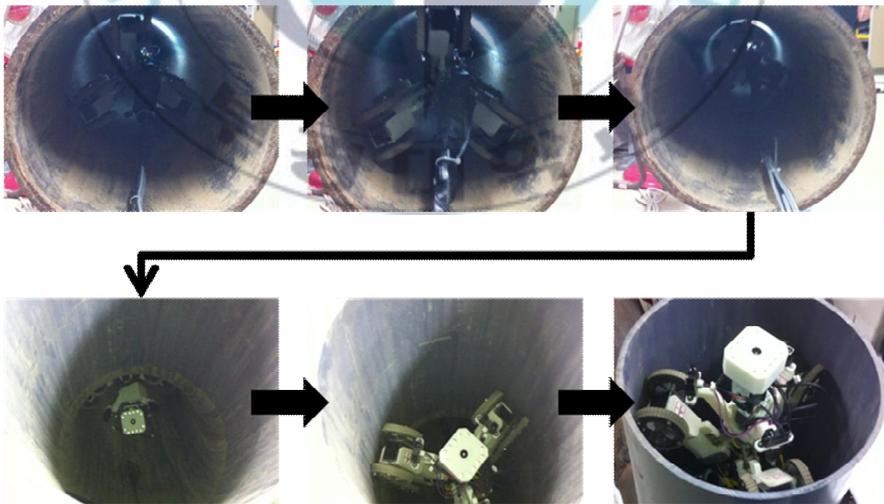


Fig. 5.15 Driving Experiments in the Pipeline

5.4 배관 탐사 결과

Fig. 5.16 은 배관탐사로봇이 배관주행 중에 촬영한 것으로 배관 내벽의 상태를 보여준다. 배관탐사로봇은 초기 직관을 거친 후, 곡관부를 지난다. 그 후 다시 직관에 들어서면서 주행을 마치게 되어있다.

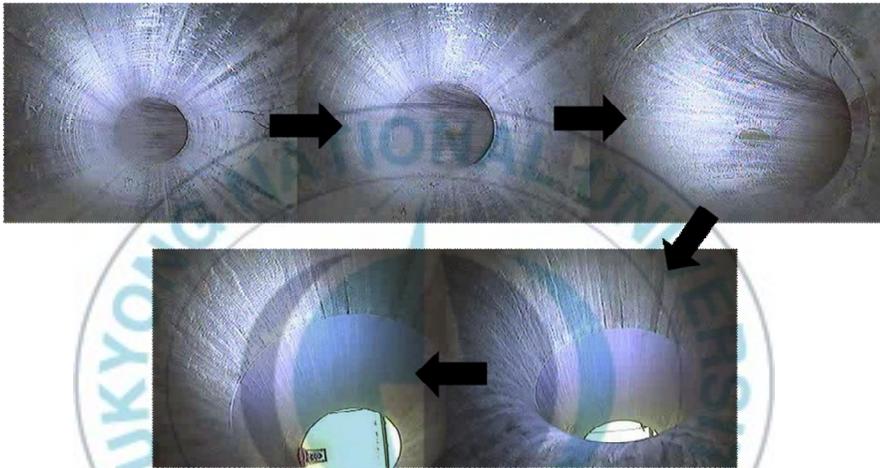


Fig. 5.16 Result of Pipeline State

제 6 장 결 론

본 연구에서는 원자력 발전소 냉각수용 해수 배관을 탐사하기 위한 배관 탐사робот의 설계 및 개발을 하였다. 이를 위해 곡관주행을 위한 알고리즘과 모터의 속도제어를 위하여 PID제어기를 제시하였고, 시뮬레이션과 실험을 통해 이들을 검증하였다. 본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

- ◆ 배관탐사робот의 Driving Module 을 120°간격으로 설치하였으며 Four-bar 구조의 링크와 중심의 스프링을 사용하여 250mm ~350mm 의 관로 내벽에 능동적으로 밀착하여 주행할 수 있는 배관탐사робот을 개발하였다. Solid Works 를 사용하여 구동시뮬레이션을 실행하여 배관탐사робот의 구조 설계를 하였으며, 실험을 위해 프로토타입 배관탐사робот을 제작하였다. 제어시스템은 마이크로컨트롤러(TMS320f28335), 적외선 센서, 엔코더, 모터드라이버, 카메라 & Pan-Tilt 부로 구성하였다.
- ◆ 배관탐사робот이 곡관을 주행할 때 기구적 손상과 모터의 과부하를 막기 위해 3개의 적외선센서를 사용한 배관 탐사робот의 곡관을 주행하기 위한 곡관주행알고리즘을 제시하였다.
- ◆ 배관탐사робот이 직경 250~350 mm 의 직선 배관 및 곡관을 주행하기 위해 모터의 모델링을 제시하였고, 이를 바탕으로 모터에 대한 곡관주행알고리즘으로부터 얻은 각바퀴의 기준

속도를 추적하는 속도제어용 PID제어기를 사용하여 시뮬레이션 및 실험을 통하여 제어기의 유효성을 보여주었다. 시뮬레이션 결과는 각 바퀴의 각속도 추적오차는 운동형태가 변경되는 시점을 제외하고 관로탐사로봇의 각속도가 기준 각속도에 잘 추적하고 있음을 보여주었다.

- ◆ 실제배관실험을 하여 제안된 제어기의 성능을 검증하였다. 직관주행구간에서는 모든 바퀴가 약 $4.0 \text{ rad/s} \pm 0.4 \text{ rad/s}$ 으로 같은 속도를 가지므로 직선주행하고 있음을 보여주며, 곡관주행구간에서는 *Wheel 2* 의 각속도가 *Wheel 3* 의 각속도가 각각 시뮬레이션 결과 5.73 rad/s 및 2.25 rad/s 와 실험결과 $5.2 \pm 0.3 \text{ rad/s}$ 및 $2.25 \pm 0.4 \text{ rad/s}$ 을 보여주고 있다. 이상과 같이 실제 실험시 곡관주행구간에서는 *Wheel 2* 와 *Wheel 3* 의 각속도들을 좀더 높게 설정해야 함을 알 수 있었다. 또한 세 바퀴의 각속도오차들은 시작구간과 배관형태가 변화하는 지점에서는 큰 오차가 발생하고 있음을 알 수 있다.
- ◆ 배관탐사로봇의 실제 배관주행실험 결과 부드러운 주행을 하였고 배관 탐사로봇의 배관주행중 배관내벽상태의 양호한 영상을 얻을 수 있었다.

향후 계획은 다음과 같다.

- ◆ 수직관 주행에 대한 모델링, 주행알고리즘과 제어기설계
- ◆ 영상데이터의 장거리유선통신을 위한 모듈개발
- ◆ 관로탐사로봇의 고장진단 및 위기대처능력에 대한 연구
- ◆ 실제 현장실험

References

- [1] 류성무, 최혁렬, “가스관 내부검사용 주행로봇 개발”, 대한기계학회논문집, A 권, 제 23 권, 제 12 호, pp. 2216 ~ 2225, 1999 년
- [2] 김도완, 노세곤, 이정섭, 이수환, 최혁렬, “클러치기반의 선택적 구동방식을 이용한 배관로봇의 개발”, 대한기계학회논문집, A 권, 제 32 권, 제 3 호, pp. 223~231, 2008 년
- [3] 노세곤, 류성무, 최혁렬, “지하 매설 가스배관용 차동 구동형 배관검사 로봇의 개발”, 대한기계학회논문집, A 권, 제 25 권, 제 12 호, pp. 2019~2029, 2001 년
- [4] 최혁렬, 류성무, “지하매설 가스관 검사로봇 개발”, 한국정밀공학회 추계학술대회 논문집, pp. 290~294, 1998 년
- [5] 최혁렬, 류성무, 이정훈, “도시가스관 내부검사용 주행로봇 개발”, 한국정밀공학회 춘계학술대회, pp. 977 ~ 981, 1998 년
- [6] 최혁렬, 류성무, 백상훈, 조성희, 송성진, 신현재, 전재욱, “지하매설 가스배관 내부검사용 로봇시스템 개발”, 한국정밀공학회지, 제 17 권, 제 2 호, pp. 121~129, 2000
- [7] S. G. Roh, H. R. Choi, “Strategy for Navigation Inside Pipelines with Differential-drive Inpipe Robot”, International Conference on Robotics & Automation, pp.2575~2580, 2002
- [8] S. G. Roh, D. W. Kim, J. S. Lee, H. P. Moon, H. R. Choi,

- “Modularized In-pipe Robot Capable of Selective Navigation Inside of Pipelines”, International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 1724~1729, 2008
- [9] S. Hirose, H. Ohno, T. Mitsui, K. Suyama, “Design of In-pipe Inspection Vehicles for ϕ 25, ϕ 50, ϕ 150 pipes”, International Conference on Robotics & Automation, pp. 2309~2314, 1999
- [10] H. Lim, J. Y. Choi, B. J. Yi, “Development of Semi-Automatic Inspection System for Indoor Pipeline”, International Conference on Mechatronics and Automation, pp. 3640~3645, 2007
- [11] K. Suzumori, T. Miyagawa, M. Kimura, Y. Hasegawa, “Micro Inspection Robot for 1-in Pipes”, IEEE Transation on Mechatronics, Vol. 4, No. 3, pp. 286~292, 1999
- [12] T. Ocada, T. Sanemori, “MOGRER: A Vehicle Study and Realization for In-Pipe Inspection Tasks”, IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. RA-3, No. 6, pp. 573~582, 1987
- [13] A. A. F. Nassiraei, Y. Kawamura, A. Ahrary, Y. Mikuriya, K. Ishii, “Concept and Design of a Fully Autonomous Sewer Pipe Inspection Mobile Robot “KANTARO””, IEEE International Conf. Robotics and Automation, pp. 136~143, 2007
- [14] M. Muramatsu, N. Namiki, R. Koyama, Y. Suga, “Autonomous Mobile Robot in Pipe for Piping Operations”, Proc. Int. Conf. Intelligent Robots and Systems, pp. 2166~2171, 2000

- [15] J. O. Jr, J. C. Adamowski, Marcos, S. G. Tsuzuki, F. Buiochi, C. S. Camerini, "Autonomous System for Oil Pipelines Inspection", Elsevier Science, pp. 731~743, 1993
- [16] K. Tsuruta, T. Sasaya, T. Shibata, N. Kawahara, "Control Circuit in an In-Pipe Wireless Micro Inspection Robot", Internation Symposium on Micromechatronics and Human, pp. 59~64, 2000
- [17] K. U. Scholl, V. Kepplin, K. Berns, R. Dillmann, "Controlling a Multijoint Robot for Autonomous Sewer Inspection", Proc. IEEE Int. Conf. Robotics, Automation, pp. 1701~1706, 2005
- [18] Majid. M. Moghaddam, A. Hadi, "Design & Modeling and Prototyping of a Pipe Inspection Robot", Int. Sym. Auto. Robo., pp. 1~5, 2005
- [19] Majid. M. Moghaddam, A. Hadi, "Control and Guidance of a Pipe Inspection Crawler (PIC)", Int. Sym. Auto. Robo., pp. 1~5, 2005
- [20] Y. S. Kwon, E. J. Jung, H. Lim, Y. J. Yi, "Design of a Reconfigurable Indoor Pipeline Inspection Robot", Int. Conf. Control. Auto. Systems, pp. 712~716. 2007
- [21] O. Tatar, D. Mandru, I. Ardelean, "Development of mobile minirobots for in pipe inspection tasks", ISSN 1392 – 1207. MECHANIKA, pp. 60~64, 2007
- [22] Peng Li, S. Ma, Bin Li, Y. Wang, "Development of an Adaptive Mobile Robot for In-Pipe Inspection Task", Int. Conf. Mechatronics and Automation, pp. 3622~3627, 2007

- [23] H. Qi, X. Zhang, H. Chen, J. Ye, "Tracing and localization system for pipeline robot", ELSEVIER Mechatronics, pp. 76~84, 2009
- [24] 전현규, 허남수, 김영진, 박윤원, 최영환, "원자력배관 건전성평가 전문가시스템 개발(II)", 대한기계학회 논문집, A 권 제 25 권, 제 6 호, pp. 1015~1022, 2001
- [25] D. W. Kim, C. H. Park, H. K. Kim, S. B. Kim, "Force Adjustment of an Active Pipe Inspection Robot", ICROSSICE, in Joint Con., pp. 3792~3797, 2009
- [26] G. V. Kostin, F. L. Chernousko and N. N. Bolotnik, "Regular Motions of a Tubecrawling Robot : Simulation and Optimization", Proc. Workshop Robot Motion, Control, pp. 45~50, 1993
- [27] F. Nickols, D. Ho, S. O. Harrold, R. T. Bradbeer and L. Yeung, "An Ultrasonically Controlled Robot Submarine for Pipe Inspection", Proc. 4th Annu. Conf. Mechatronics, Machine Vision in Practice, pp. 142~147, 1997
- [28] C. Zhu, "In-pipe Robot for Inspection and Sampling Tasks", Industrial Robot: An International Journal, Vol. 34, Issue 1, pp. 39~45, 2007
- [29] 최형식, 김동호, 김동현, 이종훈, 황광일, "새로운 구조의 유연한 배관탐사 로봇 설계", 한국마린엔지니어링학회지, 제 32 권, 제 1 호, pp. 175~183, 2008 년
- [30] K. H. Ang, G. Chong "PID Control System Analysis, Design, and Technology", Tran. Contro. Systems Technology, Vol.

13, No. 4, pp.559~576, 2005

- [31] 장윤수, 최문석, 김준석, “속도 및 전류제한을 고려한 선형전동기 구동용 고속·고정밀 통합 PID 위치제어기 구현”, 추계전력전자학술대회 논문집, pp.16~20, 2000
- [32] J. D. Lee, H. J. Lee, S. G. Oh, H. G. Joo, S. J. Seong, “Speed Control of Induction Motors using GA based PI Controller”, Proceedings ICPE Seoul, pp.404~408, 2001
- [33] V. H. Duy, N. T. Phuong, 김학경, 김상봉, “유전 알고리즘에 의한 브러시리스 DC 모터의 속도 제어용 혼합 H_2/H_∞ PID 제어기 설계”, 한국마린엔지니어링 학회 전기학술대회 논문집, pp.77~78, 2006
- [34] 유희한, 소명옥, 이윤형, 정병건, “유전알고리즘과 모델 매칭법에 기초한 디지털 PID 제어기의 DC 모터로의 응용”, 한국마린엔지니어링학회 후기학술대회 논문집, pp.67~68, 2006

Publications and Conferences

- [1] 김대원, 이경목, 박철한, 김학경, 손정현, 김상봉, 백운경, 변기식, “정찰 및 전투지원용 차량 매니 플레이터의 개발(Development of Scout/Combat Vehicle Manipulator)”, 제 16 회 지상무기학술대회, 2008
- [2] D. W. Kim, C. H. Park, H. K. Kim and S. B. Kim, “Development of an Active Inspection Robot in Variable Pipe Diamters”, ISAE 2009, 2009
- [3] D. W. Kim, C. H. Park, J. S. Im, H. K. Kim and S. B. Kim, “DEVELOPMENT AND CONTROL OF INPIPE INSPECTION ROBOT”, 11th Con. Science and technology in Vietnam, 2009
- [4] 박철한, 김학경, 김상봉, “가변적 배관의 탐사를 위한 배관탐사로봇의 개발(Novel Inpipe Inspection Robot for Adjusting to Pipeline with Variable Shape)”, 한국마린엔지니어링학회, 2010
- [5] C. H. Park, H. K. Kim, S. B. Kim, “Development of Inpipe Inspection Robot for Variable Pipe Line”, Pro. Inter. Tech. Con. Advanced Engineering, 2010

부 록

부록 A 배관탐사로봇 크기 유도

여기서 D 는 배관의 직경, R 은 배관의 곡률반경, W 는 배관 탐사로봇의 폭, L 는 배관 탐사로봇의 길이이다.

우선 곡률반경 R 과 배관지름 D 가 같다고 가정한다. 먼저 배관 탐사로봇이 곡관부에서의 모습을 두 가지로 나누어 볼 수 있다.

- I. 배관 로봇의 끝부분이 직관부에 닿아있는 경우로 Fig. A.1에 나타나 있다. 오른쪽그림은 배관 탐사로봇의 폭 W 가 가질 수 있는 최대 크기일 때의 모습이다.

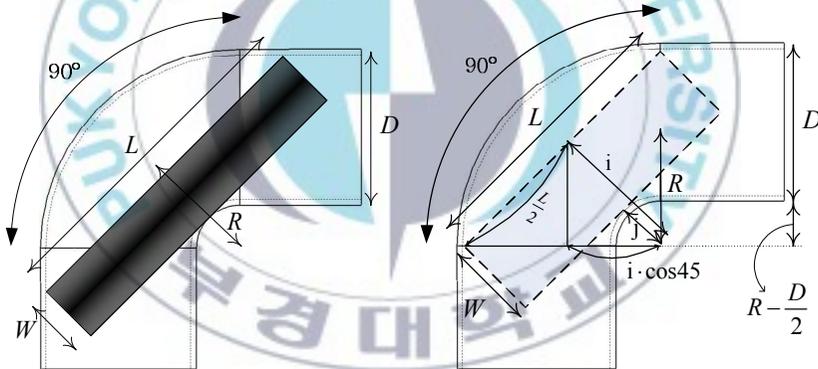


Fig. A.1 Maximum Length of Inpipe Inspection Robot Movable in Elbow

여기서 i 와 j 는 다음과 같다.

$$i = \left(R + \frac{D}{2}\right) \sin 45 \quad \text{or} \quad R - \frac{D}{2} + W$$

$$j = R - \frac{D}{2}$$
(A1)

그러므로 W 의 범위는 다음과 같다.

$$0 < W \leq (R + \frac{D}{2}) \sin 45 - (R - \frac{D}{2}) \quad (A2)$$

이때 다음 식이 성립한다.

$$\frac{L}{2} \cos 45 = R + \frac{D}{2} - i \cdot \cos 45 \quad (A3)$$

식(A3)으로부터 배관탐사robot의 최대 길이는 다음과 같다.

$$L = 2\sqrt{2} (\frac{D}{2} + R - (R - \frac{D}{2} + W) \cos 45) \quad (A4)$$

II. 배관 탐사 robot의 끝부분이 곡관부내에 닿아 있는 경우로 Fig. A.2에 나타나있다.

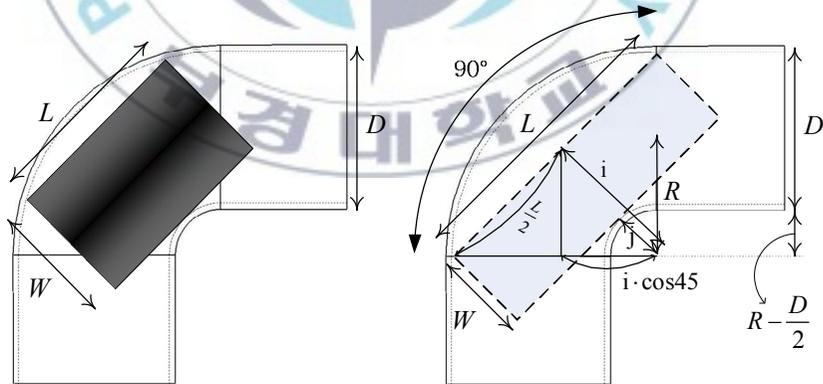


Fig. A.2 Minimum Length of Inpipe Inspection Robot Movable in Elbow

이때 W 는 다음과 같다.

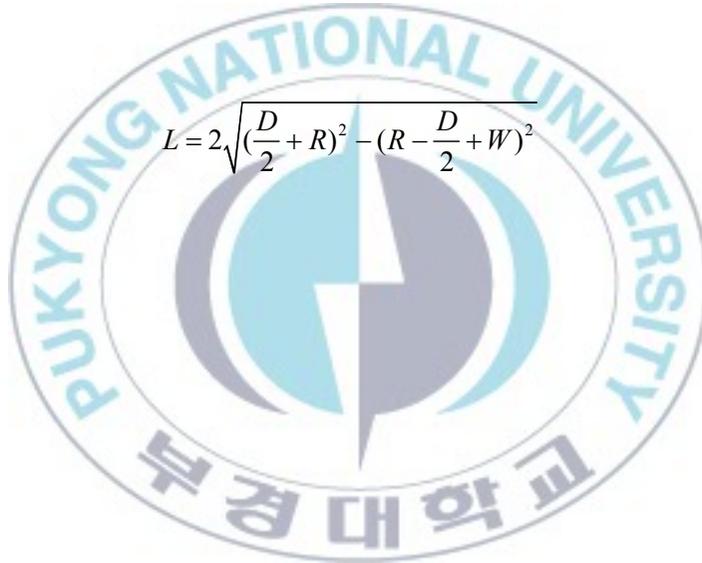
$$\left(R + \frac{D}{2}\right) \sin 45 - \left(R - \frac{D}{2}\right) < W < D \quad (\text{A5})$$

이때 아래와 같은 관계식이 성립한다.

$$\left(R + \frac{D}{2}\right)^2 - \left(R - \frac{D}{2} + W\right)^2 = \left(\frac{L}{2}\right)^2 \quad (\text{A6})$$

곡관부를 이동할 수 있는 배관탐사робот의 최소 길이는 식(A6)으로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L = 2 \sqrt{\left(\frac{D}{2} + R\right)^2 - \left(R - \frac{D}{2} + W\right)^2} \quad (\text{A7})$$



부록 B 하드웨어

1. 적외선 센서

배관탐사робот에서 배관 벽면까지의 거리를 측정하기 위하여 본 연구에서 사용한 적외선 센서는 GP2Y0A21YK이고, 센서의 제원은 다음과 같다.

입력전압 : 4.5 ~ 5.5V DC

출력전압 : 0.6 ~ 4.7V 아날로그 출력

측정범위 : 10 ~ 80 cm

응답속도 : 5 ms

적외선 센서의 외형은 Fig. B.1와 같다.



Fig. B.1 Infrared Sensor

2. 카메라

Fig. B.2와 B.3은 카메라와 카메라 컨트롤러를 나타낸 것이다.



Fig. B.2 Camera(CNB-1760P)



Fig. B.3 Controller for Camera(EZ-UDVR)

위의 특징 및 기능은 다음과 같다.

- 최대 480fps의 고화질 동영상 감시 및 녹화 기능
- 다양한 감시화면 레이아웃 변환 기능
- 카메라 별로 해상도, 프레임 수 조절 가능
- 녹화 이미지 미리보기 기능
- Network을 통한 원격 관리

3. 컨트롤러 & 모터 드라이버

Fig. B.4는 DSP TMS320F28335와 주변 인터페이스 회로로 구성된 PCB의 모습이다.

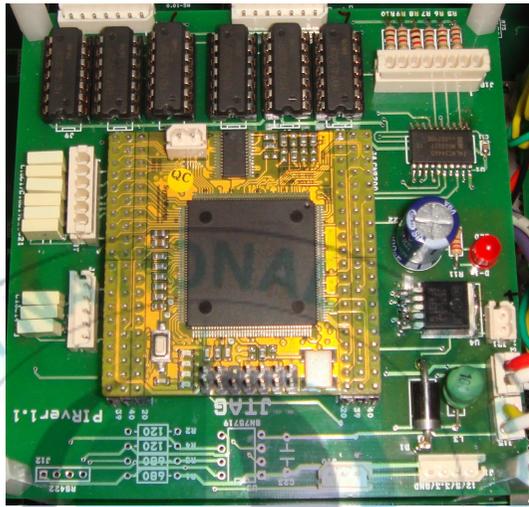


Fig. B.4 DSP Control Board

Fig. B.5는 DC모터 드라이버를 나타낸 것이고, 모두 3개를 사용하였다.



Fig. B.5 DC Motor Driver

4. 모터

배관탐사робот의 주행을 위해 사용되는 DC모터는 Fig. B.6에 나타나 있고 제원은 Table B.1에 나타나 있다.



Fig. B.6 DC Motor

Table B.1 Specification of Motor

Items	Values
Rated Volt	24V
Rated Torque	130g-cm
Rated Speed	6160rpm
Rated Current	500mA
No load Speed	7300rpm
No load Current	80mA
Rated Output	8.5W

감사의 글

공학도로서 갖추어야 할 자질을 위해 하나하나 아낌없는 지도와 격려를 주셨고, 본 논문이 완성되기까지 학문의 길을 이끌어 주신 김상봉 지도교수님께 감사의 말씀을 드립니다. 부족함이 많은 저를 학부시절부터 지금까지 연구활동에 대한 많은 가르침과 사람으로서의 도리를 배우게 되어 감사합니다. 논문 심사 과정에서 따끔한 충고와 조언을 주신 정영석 교수님과 강인필 교수님께 깊은 감사의 말씀을 드립니다. 그리고 항상 옆에서 연구를 지도하며 많은 조언을 해주신 김학경 교수님께도 진심으로 감사의 말씀을 드립니다.

CIMEC Lab.의 선배님들이신 전봉환 선배님, 김성민 선배님, 김진호 선배님, 서진호 선배님, 감병오 선배님, 이근유 선배님, 이원기 선배님, 김성욱 선배님, 전양배 선배님, 김영규 선배님, 임재성 선배님, 김상찬 선배님, 박바다 선배님, 마성진 선배님, 김병용 선배님, 이희숙 선배님께 감사 드립니다. 그리고 외국인 유학생인 Phuc 선생님, Tung 선생님, Hieu, Lam, Dung 에게도 감사의 말씀 드립니다.

CIMEC Lab 에서 생활하면서 많은 도움을 주었던 선배님들, 후배님들 감사드립니다. 특히 동기이자 친구인 이경목, 항상 이해해주고 모범이 되어 주어서 정말 감사합니다. 그리고 연구실 일뿐만 아니라 그 외적인 모든것에 신경을 써주신 동기 김대환형께 진심으로 감사드립니다. 연구실 선배이자 친구인 정준호, 연구실원 모두의 활력소 같은 역할을 해주어 너무 고맙습니다. 그리고 연구실 생활을 하며 많은 도움을 받은 Duy, Phuong, Hung, Thinh, Tuan, Giang, 윤석민형, 김대원형, 이도경형, 최낙순형, 신종훈형 그리고 후배들인 김서광, 박유미, 배민지, 정우영에게 감사 드립니다.

마지막으로 저를 항상 믿고 응원하시는 아버지, 착한 아들이라며 주위에 항상 자랑하시는 어머니, 두분 모두 사랑합니다. 그리고 나에게 둘도 없는 형에게 감사의 인사를 전합니다.